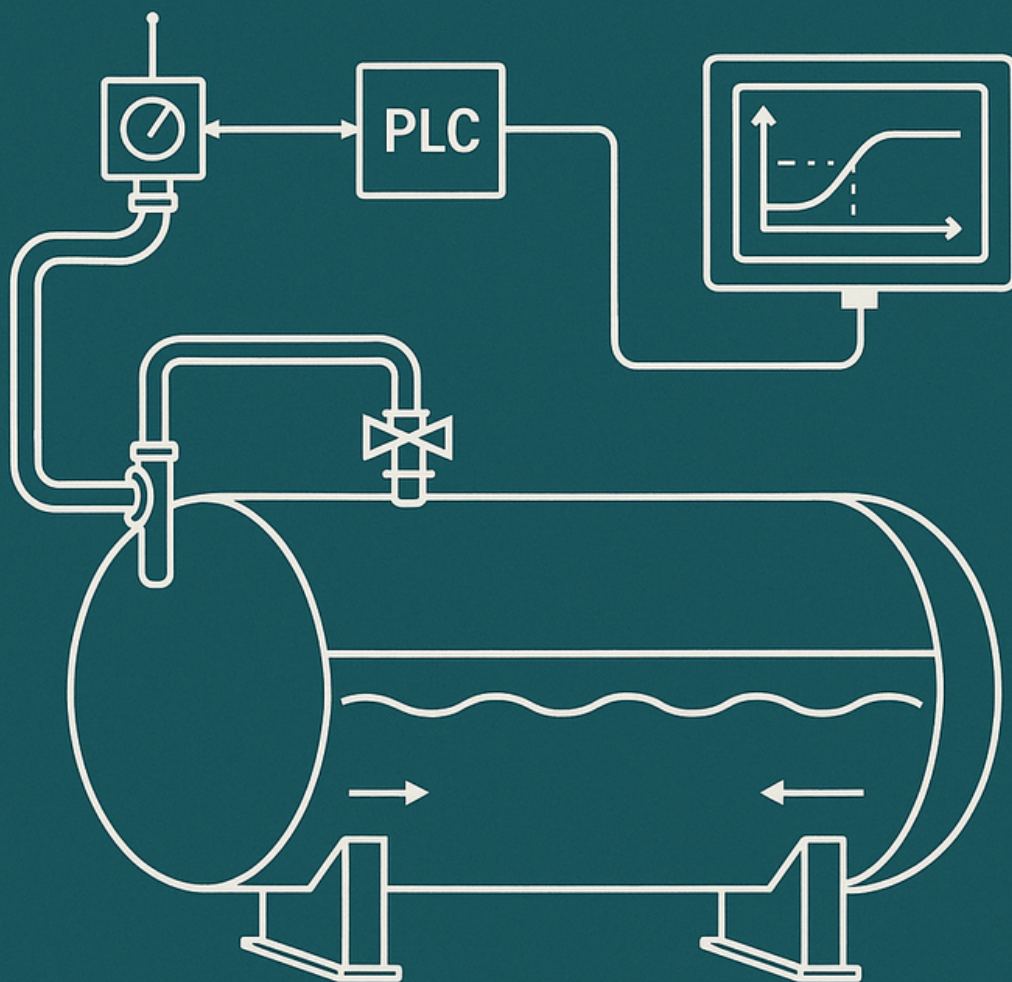


DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL CONTROL DINÁMICO DE LÍQUIDOS EN TANQUES CILÍNDRICOS HORIZONTALES



DAVID GRÁNDEZ NORIEGA, LEONARDO MYKEL DÁVILA
RENGIFO, FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, JORGE
ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO, LUIS ANTONIO FLORES FLORES

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

Editor



David Grández Noriega

davidgrandeznoriega@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0008-2273-6314>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Leonardo Mykel Dávila Rengifo

miltrax10@gmail.com

 <http://orcid.org/0009-0000-4289-1348>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Fernando Javier Salas Barrera

fernando.salas@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-0177-3553>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Jorge Armando Vásquez Pinedo

jorge.armando@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-8811-4832>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

Luis Antonio Flores Flores

luis.flores@unapiquitos.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-1981-2012>

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana
Facultad de Ingeniería Química, Iquitos – Perú

INDICE

RESEÑA.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
PARTE I.....	11
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	13
Antecedentes	14
Bases teóricas	17
Ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos	17
Relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal	18
Nivel inicial de líquido	20
Volumen inicial de líquido	20
Tiempo de llenado del tanque cilíndrico horizontal	20
Tiempo de vaciado del tanque cilíndrico horizontal	21
Nivel final de líquido	21
Volumen final de líquido	21
Definición de términos básicos	22
Sistema de control automático.....	23
Relé programable.....	23
Cable de transmisión de datos	24
Entradas y salidas físicas de un relé programable	25
Contacto normalmente abierto (NA)	25
Contacto normalmente cerrado (NC)	25
Diagrama ladder o lógica de contactos.....	26
Temporizadores	27
Caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal	27
Caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal.....	27
Variables de control automático	28
Enclavamiento o retención	29
PARTE II.....	33
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	34
Formulación de la hipótesis	34

Hipótesis general	35
Hipótesis específicas.....	36
Variables y su operacionalización.....	37
A. En el control automático	38
B. En la operación de llenado	39
C. En la operación de vaciado	39
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	41
Tipo y diseño	41
Equipo para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo en un tanque cilíndrico horizontal, antes de la implementación del sistema automatizado.....	45
Propuesta de diseño para la implementación del sistema automatizado	29
Elaboración del diagrama ladder	31
Orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable....	36
Relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de las salidas físicas del relé programable	37
Implementación del sistema automatizado	38
Diseño muestral.....	43
Procedimientos de recolección de datos.....	44
Procesamiento y análisis de datos	46
Aspectos éticos.....	48
PARTE III	50
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	52
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA.....	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	69
Anexo 1. Hoja de cálculo para la operación de llenado.....	70
Anexo 2. Hoja de cálculo para la operación de vaciado.	71

**Anexo 3. Vistas de las pruebas de funcionamiento del sistema automatizado para
el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal..... 72**

RESEÑA

Este libro presenta una propuesta integral de diseño, construcción e implementación de un **sistema automatizado para el control dinámico del llenado y vaciado de líquidos** en tanques cilíndricos horizontales, combinando fundamentos teóricos de ingeniería con aplicaciones prácticas de automatización industrial.

La obra está estructurada en tres partes que abordan desde el marco teórico y conceptual del sistema —incluyendo ecuaciones de balance de masa, geometría de tanques y fundamentos de control automático— hasta la programación de un relé inteligente haciendo uso de los diagramas tipo ladder. A través de una metodología rigurosa y un enfoque cuantitativo, se diseñaron, programaron y validaron diez ciclos operativos completos bajo condiciones controladas.

El libro destaca por su claridad en la exposición, el uso preciso de lenguaje técnico y la integración entre el modelado matemático y la simulación computacional con herramientas como **Microsoft Excel 2023** y **Zelio Soft2 V5.4.2**. A lo largo del texto se incluyen diagramas, tablas de datos, análisis de error porcentual, pruebas comparativas entre valores teóricos y reales, así como documentación completa del montaje y programación de un relé inteligente.

Dirigida a estudiantes, docentes, investigadores y profesionales en ingeniería química, mecánica, electrónica o afines, esta obra constituye un valioso recurso académico y técnico para comprender y aplicar los principios de automatización en sistemas hidráulicos con geometrías no convencionales. Su carácter práctico, replicable y educativo lo convierte también en una herramienta útil en laboratorios de control de procesos y proyectos de innovación tecnológica.

En conjunto, esta publicación contribuye significativamente al fortalecimiento del conocimiento aplicado en el campo de la automatización, abriendo nuevas posibilidades para el diseño de soluciones eficientes, precisas y seguras en el manejo inteligente de fluidos industriales.

INTRODUCCIÓN

Determinar con precisión el volumen que ocupa un líquido dentro de un tanque cilíndrico dispuesto en posición horizontal representa un desafío técnico significativo. A diferencia de los tanques verticales —en los que la relación entre nivel y volumen suele ser directa y más fácilmente modelable—, en los tanques horizontales dicha relación es **no lineal** y requiere del uso de **cálculo integral** para ser representada con exactitud. Esta complejidad geométrica impone una exigencia adicional en la medición y control del volumen, especialmente en contextos industriales donde la precisión en los niveles de almacenamiento y distribución de fluidos es crítica.

En ese sentido, resulta fundamental contar con una ecuación que relacione el volumen con el nivel del líquido y las dimensiones del tanque, considerando el radio y la longitud como parámetros, mientras que el nivel del líquido actúa como la variable independiente y el volumen como variable dependiente. Esta formulación matemática se convierte en la base para el desarrollo de sistemas de automatización capaces de controlar y supervisar de forma eficiente el llenado y vaciado de líquidos.

En la **Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (FIQ-UNAP)**, esta problemática tiene una repercusión directa en la formación académica de los estudiantes. Cursos como **Mecánica de Fluidos**, **Laboratorio de Ingeniería I** y **Automatización de Procesos Químicos** exigen que los futuros profesionales desarrollen competencias en la **medición, simulación y control de variables industriales dependientes del tiempo**, como el volumen, el nivel y el caudal de fluidos. Sin embargo, hasta hace pocos años, estas prácticas se veían limitadas por la ausencia de equipos funcionales y tecnología actualizada.

En el año 2013, se desarrolló en la FIQ-UNAP el proyecto titulado: *Diseño, construcción e instalación de un tanque cilíndrico horizontal para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo* (Arce y Arce, 2013). Sin embargo, con el paso del tiempo, el equipo construido se deterioró: perdió el visor para la lectura de niveles y carecía de las electrobombas necesarias para automatizar los procesos de llenado y vaciado. Esta situación impidió el uso efectivo del equipo en las prácticas académicas, limitando el desarrollo de habilidades esenciales en el área de automatización.

Frente a esta problemática, surge el presente trabajo, el cual tiene como finalidad **implementar un sistema automatizado funcional**, que no solo recupere el valor pedagógico del equipo, sino que **incorpore tecnologías de control modernas** a través del uso de relés programables, diagramas tipo ladder y herramientas de simulación computacional.

La investigación se enmarca en la siguiente pregunta general:

¿Cuál es el sistema automatizado más adecuado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal?

A partir de esta interrogante, se han formulado los siguientes **problemas específicos**:

1. ¿Existe alguna relación entre el volumen del líquido y su nivel en un tanque cilíndrico horizontal?
2. ¿Existe alguna relación entre el volumen inicial, el volumen final, y los volúmenes de llenado y vaciado?
3. ¿Existe relación entre el tiempo de operación y los volúmenes manipulados en el tanque?
4. ¿Cuál es el circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado del tanque?
5. ¿Existe una relación entre las condiciones de entrada, el estado de las bobinas internas, los temporizadores y las salidas físicas del relé programable?

Para responder a estas preguntas, se estableció el siguiente **objetivo general**:

Implementar un sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

Y se definieron los siguientes **objetivos específicos**:

- Determinar la relación entre volumen y nivel del líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

- Establecer la relación entre volumen inicial, volumen final, y los volúmenes de llenado y vaciado.
- Analizar la relación entre el tiempo de operación y los volúmenes involucrados.
- Elaborar el circuito lógico más eficiente para el control automático del sistema.
- Evaluar la correspondencia entre las condiciones de entrada, el estado de las bobinas internas, los temporizadores y las salidas físicas del relé programable.

La importancia de esta investigación radica en su **impacto directo en la mejora de la infraestructura académica de la FIQ-UNAP**, al contribuir a la modernización de los laboratorios y permitir que los estudiantes puedan acceder a **experiencias reales de automatización de procesos industriales**. Además, promueve el desarrollo de capacidades en áreas como el diseño de sistemas de control, simulación computacional, programación lógica y análisis de comportamiento dinámico de fluidos.

Este libro documenta todo el proceso investigativo: desde los fundamentos teóricos y matemáticos, el diseño y montaje del sistema, la programación y simulación, hasta las pruebas de funcionamiento y análisis de resultados. El objetivo final es ofrecer una solución automatizada funcional, replicable y útil tanto en contextos educativos como industriales, fortaleciendo la formación técnica de los futuros ingenieros de la Amazonía Peruana.

PARTE I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONCEPTUALES

En el campo de la automatización de procesos industriales, el diseño y control de sistemas para la gestión eficiente de líquidos en tanques de almacenamiento constituye una problemática técnica de alta relevancia. Esta primera parte del libro se orienta a establecer los fundamentos conceptuales, físicos y computacionales que sustentan el desarrollo de un sistema automatizado aplicado a tanques cilíndricos horizontales, un tipo de recipiente ampliamente utilizado en industrias químicas, alimentarias, energéticas y de saneamiento.

Se inicia con una revisión de antecedentes relacionados con investigaciones similares y aplicaciones existentes, lo cual permite contextualizar el presente estudio dentro del desarrollo tecnológico actual. A continuación, se presentan los fundamentos de la ingeniería de procesos vinculados al balance de masa en sistemas no reactivos, esenciales para comprender cómo varía el volumen de un fluido en función del tiempo y en condiciones controladas del caudal.

La geometría particular de los tanques cilíndricos horizontales impone desafíos específicos para el cálculo preciso del volumen en función del nivel del líquido, lo que exige un tratamiento matemático riguroso. En esta sección se exponen las fórmulas pertinentes, junto con ejemplos prácticos que ilustran el comportamiento dinámico del fluido en operaciones de llenado y vaciado.

Asimismo, se desarrollan las bases del control automático, desde los conceptos más elementales hasta la programación de componentes clave como los relés inteligentes, haciendo uso de los diagramas tipo ladder. Estos elementos permiten implementar lógicas de control que simulan decisiones humanas dentro de un entorno automatizado, y que aseguran la eficiencia, precisión y seguridad en la operación de los sistemas.

Esta parte no solo proporciona el marco teórico indispensable, sino que también articula los conocimientos necesarios para el diseño e implementación del sistema

descrito en las secciones posteriores. El lector encontrará aquí un soporte técnico claro, lógico y coherente, que conecta la teoría con la aplicación práctica y que habilita la comprensión profunda del proyecto de automatización propuesto.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

El presente capítulo tiene como finalidad establecer las bases teóricas y conceptuales que sustentan el desarrollo del sistema automatizado de control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales. En cualquier proyecto de ingeniería aplicada, el sustento teórico constituye el andamiaje sobre el cual se construyen tanto el diseño como la implementación de soluciones técnicas viables, eficientes y replicables.

En primer lugar, se revisan antecedentes relevantes de investigaciones previas, con el propósito de identificar los aportes existentes en el campo del control automático de fluidos y destacar los vacíos que este estudio busca abordar. Este ejercicio permite contextualizar el problema dentro del panorama académico y tecnológico actual, y justificar la pertinencia del sistema propuesto.

Luego, se abordan los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para comprender el comportamiento de los líquidos en recipientes no convencionales, como los tanques cilíndricos horizontales. Dado que la relación entre el volumen y el nivel del líquido en este tipo de tanques no es lineal, se requiere el uso de ecuaciones específicas derivadas del balance de masa para procesos no reactivos. Se exponen también los criterios para el cálculo de tiempos de llenado y vaciado, así como los parámetros geométricos y operacionales involucrados.

Adicionalmente, se introducen los conceptos esenciales de automatización y control, detallando el funcionamiento del relé programable como unidad central del sistema. Se explican las lógicas de programación utilizadas (en especial el diagrama ladder), y la relación entre las variables involucradas en el control automático y en las operaciones de llenado y vaciado. Estos conocimientos permiten comprender cómo se traduce el comportamiento físico de un sistema hidráulico en lógica programada capaz de controlar con precisión su operación.

Finalmente, este capítulo define los términos técnicos clave que se utilizarán a lo largo del estudio, estableciendo un lenguaje común que facilite la comprensión de los capítulos siguientes. Así, el marco teórico y referencial no solo consolida el conocimiento

necesario, sino que conecta de forma estructurada la teoría con la realidad operativa del sistema propuesto.

Antecedentes

El análisis de antecedentes permite comprender cómo ha evolucionado el conocimiento en torno al control automático de líquidos en sistemas de almacenamiento, particularmente en estructuras con geometrías complejas como los tanques cilíndricos horizontales. Esta revisión es esencial para identificar las bases sobre las que se sustenta el presente estudio, reconocer experiencias previas, así como destacar los aportes, limitaciones y vacíos existentes en la literatura técnica y científica.

A nivel internacional, diversos trabajos han abordado la automatización del control de nivel de líquidos en tanques industriales, enfocándose en la aplicación de controladores lógicos programables (PLC), sensores ultrasónicos, válvulas motorizadas y sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA). Estas investigaciones han demostrado que la automatización no solo incrementa la precisión en el monitoreo del nivel, sino que también mejora la seguridad operativa y reduce los tiempos muertos en los procesos de carga y descarga de fluidos.

En el contexto nacional, los estudios relacionados con la automatización de procesos hidráulicos han sido limitados y, en muchos casos, centrados en tanques de geometría vertical, donde la relación entre nivel y volumen es más lineal y, por tanto, más simple de modelar. Esto representa una brecha importante, ya que en la práctica industrial los tanques horizontales son ampliamente utilizados debido a su eficiencia en espacio y estabilidad estructural, especialmente en sectores como el alimentario, petrolero y farmacéutico.

Por tanto, este proyecto busca contribuir con un enfoque más especializado, incorporando el diseño y simulación de un sistema automatizado adaptado a la geometría de tanques cilíndricos horizontales. La propuesta incluye el desarrollo de lógica de control programable y su validación mediante pruebas prácticas, marcando una diferencia significativa frente a estudios previos que se limitaban al análisis teórico o al control manual.

En suma, los antecedentes revisados confirman la relevancia y originalidad de esta investigación, al mismo tiempo que refuerzan su viabilidad técnica y su potencial aplicación en entornos reales de producción y almacenamiento de líquidos.

Chong y Ferreyra (2023, pp. xii, 39-73), desarrollaron el trabajo de tesis cuyo título es: “Construcción e instalación de un prototipo para llenado de botellones con agua y su implementación con un controlador lógico programable”. Para esto, diseñaron el circuito lógico que les permitió llevar a cabo la simulación del llenado de botellones con agua; evaluándose de este modo el número de entradas y salidas físicas que se emplearon en el PLC, las cuales resultaron: tres entradas y tres salidas físicas. Seguidamente, evaluaron el caudal producido por la electrobomba de llenado, el cual resultó 28.3 L/min. Finalmente, llevaron a cabo las pruebas de funcionamiento del mencionado prototipo, para lo cual hicieron uso de tres conjuntos de botellones, teniendo los correspondientes volúmenes nominales: cinco (5) de 3.8 L, dos (2) de 4.5 L y tres (3) de 20 L; resultado los respectivos tiempos de llenado: 8.1 s, 9.5 s y 42.4 s. En los diez botellones que utilizaron, determinaron que la menor y mayor diferencia entre el volumen de etiqueta y el volumen experimental fueron: 0.342 % y 2.000 %, respectivamente, el mismo que no excedió del 2 % en relación al volumen de etiqueta, comprobando de este modo que dicho prototipo tiene una eficiencia mayor al 98 %.

Estrella y Panduro (2023, pp. xi, 1-60), realizaron el trabajo de tesis titulado: “Mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado”. En este trabajo, primeramente, dedujeron un modelo matemático mediante el cual pudieron determinar el tiempo para drenar una cierta cantidad de volumen de líquido en tanques cónicos, para lo cual aplicaron la ecuación de continuidad y la ecuación general de la energía. Seguidamente, elaboraron el diagrama ladder haciendo uso del software Zelio Soft2 V5.4.2, lo cual también les permitió hacer la simulación del control automático del drenaje de líquidos en tanques cónicos. Para transferir el diagrama ladder desde una PC al relé programable, utilizaron una interfaz de comunicación, la cual cuenta con dos puertos: COM y USB. A continuación, procedieron a realizar el montaje del sistema automatizado, el mismo que se ensambló con los siguientes componentes: un relé programable, el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2, la interfaz de comunicación, una válvula solenoide, un

pulsador de paro, un pulsador de inicio, un piloto indicador y una llave térmica con su enchufe bipolar. Por último, efectuaron ocho (8) pruebas de funcionamiento, en las cuales se determinaron el tiempo programado en el sistema automatizado, los mismos que resultaron: 58.6 s, 56.2 s, 59.1 s, 50.6 s, 49.0 s, 67.4 s, 59.5 s y 54.5 s, respectivamente. Asimismo, los resultados que obtuvieron en las ocho pruebas de funcionamiento, indican que el máximo porcentaje de error, en relación al nivel final de líquido, al volumen final de líquido y al volumen de drenaje, son: 1.27 %, 3.85 % y 2.02 %, respectivamente; lo cual les permitió verificar que, al hacer uso del mencionado modelo matemático, se logran obtener resultados con una confiabilidad mayor al 95 %.

Jara y Ramos (2018, pp. xi, 99-101), realizaron el trabajo de tesis titulado: “Diseño y construcción de un prototipo automatizado de un sistema de bombeo de agua para riego pecuario y consumo humano utilizando energía fotovoltaica”. En este trabajo, han tenido en cuenta el problema de la defectuosa aplicación de sistemas fotovoltaicos en sistemas de riego automatizado en las zonas alto andinas, considerando para esto el centro poblado de Ichu, en donde plantearon hacer el prototipo automatizado con paneles fotovoltaicos y realizar el diseño conveniente con la metodología de cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de cebolla de 4.56 mm/día con un área de cultivo de 200 m² y un sistema de riego localizado con eficiencia del 90 % y un caudal de 0.46 L/s, tiempo de riego de 1.14 h/día, con tubería principal de 29.4 mm de diámetro y 12 laterales de 17.4 mm. La evaluación de la cantidad de paneles lo realizaron con datos de heliógrafo mensuales de 5.76 h – pico/día, con un flujo volumétrico de 3.23 L/min y paneles cristalinos Siemens de 12 V y 4.83 A; determinándose de esta forma que la cantidad de paneles requeridos es igual a cuatro (4), con una potencia de 231.84 W cada uno. El sistema automatizado estuvo implementado con el micro controlador Arduino UNO, el cual lo programaron haciendo uso de C/C⁺⁺. Los costos del sistema de riego fotovoltaico y del sistema convencional a electricidad fueron de S/ 5787.7 y S/ 11247.16, respectivamente; concluyendo de esta forma, que el costo del sistema de riego fotovoltaico es mucho menor y que el proyecto es viable a nivel de costos y energía limpia.

Bases teóricas

Ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos

Felder y Rousseau (2004, p. 546), mencionan que la ecuación general de balance de masa, para procesos no reactivos (sin reacción química), está conformada por tres términos: acumulación, entrada y salida, los cuales se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida.} \quad (1)$$

Sean $\hat{m}_E(\text{kg/s})$ y $\hat{m}_S(\text{kg/s})$ los flujos másicos a las cuales la sustancia A entra y sale de un proceso, respectivamente. Realizando un balance de masa para la sustancia A, desde un tiempo t , hasta un tiempo posterior $t + \Delta t$, se tiene:

$$\text{Entrada} = \hat{m}_E(\text{kg/s}) \Delta t(\text{s}).$$

$$\text{Salida} = \hat{m}_S(\text{kg/s}) \Delta t(\text{s}).$$

Entonces, la masa acumulada de la sustancia A, dentro del sistema en el intervalo de tiempo Δt , es: $\Delta m(\text{kg})$. En consecuencia, la ecuación general de balance de masa para la sustancia A, queda:

$$\Delta m = (\hat{m}_E - \hat{m}_S)\Delta t. \quad (2)$$

Dividiendo a todas las cantidades de la ecuación (2) entre Δt y haciendo que Δt se aproxime a cero ($\Delta t \rightarrow 0$), se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dm}{dt} = \hat{m}_E - \hat{m}_S. \quad (3)$$

La ecuación (3), se conoce como la ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos. En el caso que la sustancia A sea un líquido (fluido incompresible), la ecuación (3) queda en términos del volumen (V) y los flujos volumétricos a la entrada $Q_E(\text{m}^3/\text{s})$ y salida $Q_S(\text{m}^3/\text{s})$ de un proceso, esto es:

$$\frac{dV}{dt} = Q_E - Q_S. \quad (4)$$

Relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal

A continuación, se puede observar un esquema de un tanque cilíndrico horizontal (figura 1), el cual tiene las áreas laterales planas y circulares, con un radio R_T . La longitud del tanque y el nivel de líquido, se denotan por: L_T y h , respectivamente.

Entonces, el diferencial de volumen (dV), correspondiente al diferencial de nivel de líquido (dh), es:

$$dV = 2L_T x dh. \quad (5)$$

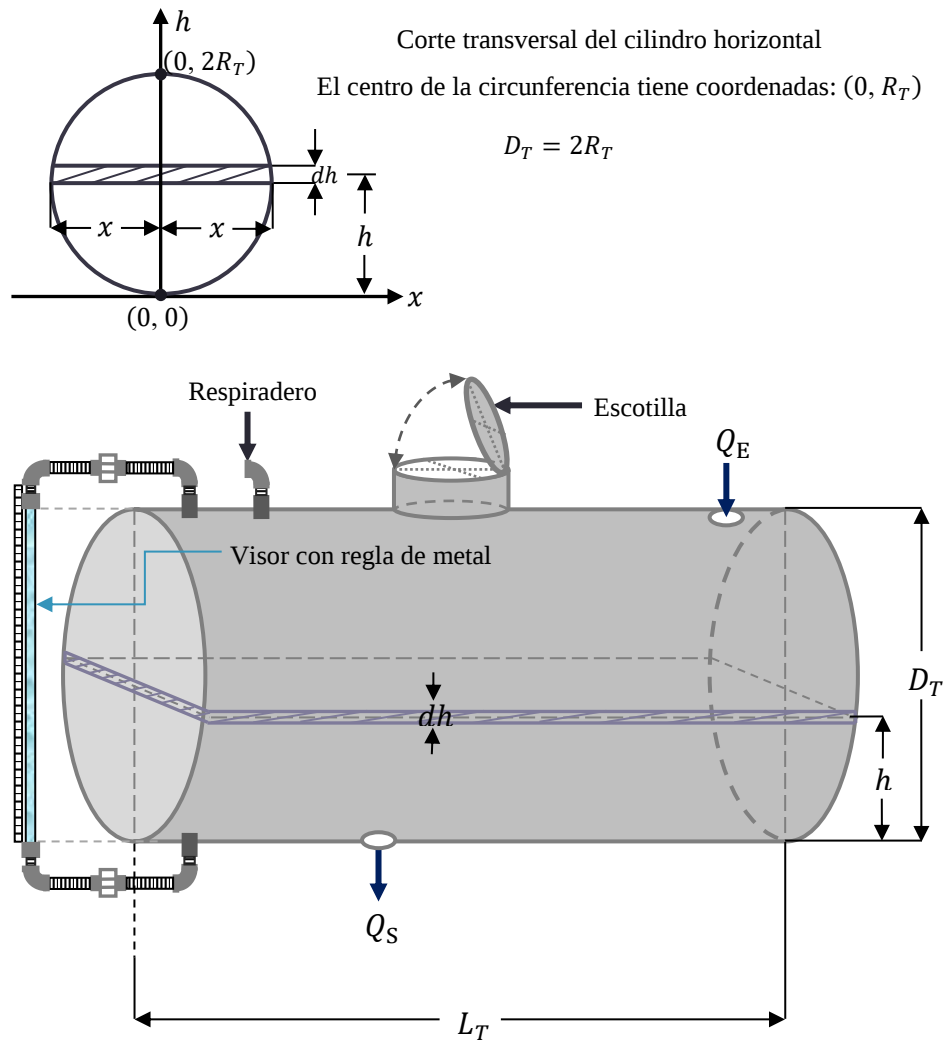


Figura 1. Esquema de un tanque cilíndrico horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la ecuación de la circunferencia para las áreas laterales, se tiene:

$$(x - 0)^2 + (h - R_T)^2 = R_T^2. \quad (6)$$

Despejando x de la ecuación (6), se tiene:

$$x = \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2}. \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación (7) en la ecuación (5), se obtiene:

$$dV = 2L_T \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} dh. \quad (8)$$

Para resolver el término que está al lado derecho de la ecuación (8), se aplica la siguiente fórmula de integración (Venero, 2020, p. 682):

$$\int \sqrt{a^2 - u^2} du = \frac{1}{2} \left[u \sqrt{a^2 - u^2} + a^2 \arcsen\left(\frac{u}{a}\right) \right] + C. \quad (9)$$

Para esto, también es necesario que se realicen los siguientes cambios de variables: $u = h - R_T$ y $a = R_T$. Entonces, la ecuación (8) queda:

$$V = L_T \left[(h - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen\left(\frac{h - R_T}{R_T}\right) \right] + C. \quad (10)$$

Donde C es la constante de integración, de la cual se obtiene su valor reemplazando las siguientes condiciones: si $h = 0$, entonces $V = 0$.

$$0 = L_T \left[(0 - R_T) \sqrt{R_T^2 - (0 - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen\left(\frac{0 - R_T}{R_T}\right) \right] + C$$

$$0 = L_T \left[-R_T \sqrt{R_T^2 - R_T^2} + R_T^2 \arcsen\left(\frac{-R_T}{R_T}\right) \right] + C$$

$$L_T [0 + R_T^2 \arcsen(-1)] + C = 0$$

$$C = \frac{\pi}{2} L_T R_T^2. \quad (11)$$

Sustituyendo la igualdad (11) en la igualdad (10), se obtiene la ecuación (12):

$$V = L_T \left[(h - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (12)$$

La igualdad (12), muestra que el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal, están en relación. Es decir, se puede evaluar el valor del volumen (V), para cualquier valor del nivel de líquido (h). Téngase en cuenta en esta ecuación, que L_T y R_T son parámetros, los cuales sólo cambiarán si se modifican las dimensiones del tanque.

Nivel inicial de líquido

Da a conocer a la altura inicial de líquido en el tanque cilíndrico horizontal (Mott, 2015, p. 141), se simboliza como h_i y se puede evaluar haciendo una inspección al visor que se encuentra colocado en el tanque cilíndrico horizontal.

Volumen inicial de líquido

Es el volumen correspondiente a h_i (Mott, 2015, p. 141), se denota como V_i y su valor se puede obtener reemplazando el valor de h_i en la ecuación (12), tal como se indica a continuación:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

Tiempo de llenado del tanque cilíndrico horizontal

Es el periodo requerido para llenar el tanque cilíndrico horizontal con una determinada cantidad de líquido. Su simbolización es t_{LL} , sus unidades de medida están en s y min (Mott, 2015, p. 141) y se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$$

Donde:

V_{LL} = volumen de llenado, m^3 , L.

Q_E = caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal, m^3/s , L/min.

Tiempo de vaciado del tanque cilíndrico horizontal

Es el periodo requerido para vaciar del tanque cilíndrico horizontal una determinada cantidad de líquido. Su simbolización es t_V , sus unidades de medida están en s y min (Mott, 2015, p. 141) y se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$t_V = \frac{V_V}{Q_S}. \quad (15)$$

Donde:

V_V = volumen de vaciado, m^3 , L.

Q_S = caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal, m^3/s , L/min.

Nivel final de líquido

Se simboliza como $h_{f(Ex)}$ y da a conocer a la altura de líquido en el tanque cilíndrico horizontal al culminar las operaciones de llenado y vaciado. En este caso, sólo se considera el valor experimental, el cual se puede evaluar haciendo una inspección al visor que está situado en el mencionado tanque (Estrella y Panduro, 2023, pp. 21-22).

Volumen final de líquido

Da a conocer a la cantidad de líquido que queda en el tanque cilíndrico horizontal, al culminar las operaciones de llenado y vaciado (Mott, 2015, p. 141; Estrella y Panduro, 2023, p. 22). Para este caso, los valores teóricos y experimentales se denotan como $V_{f(T)}$ y $V_{f(Ex)}$, respectivamente, los mismos que se pueden evaluar tal como se indican en las ecuaciones (16), (17) y (18).

Para el llenado:

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$$

Para el vaciado:

$$V_{f(T)} = V_i - V_V. \quad (17)$$

Para el llenado y vaciado:

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

Definición de términos básicos

Antes de profundizar en los aspectos técnicos y operativos del sistema automatizado propuesto, resulta indispensable establecer con claridad los términos clave que serán utilizados a lo largo del presente estudio. Esta sección tiene como propósito uniformizar el lenguaje técnico, evitar ambigüedades conceptuales y facilitar la comprensión de los procesos implicados en el diseño, implementación y análisis del sistema de control de líquidos en tanques cilíndricos horizontales.

En el ámbito de la automatización industrial y la ingeniería de procesos, ciertos conceptos como “nivel de líquido”, “volumen efectivo”, “relé programable”, “temporizador”, “caudal de entrada” o “diagrama ladder” poseen significados específicos que deben ser comprendidos en su correcta dimensión técnica. Asimismo, otros términos vinculados al control lógico, a la estructura del tanque o a los componentes del sistema, requieren una definición precisa para garantizar la rigurosidad del análisis.

La correcta interpretación de estos términos no solo facilita el desarrollo metodológico y experimental del proyecto, sino que también es esencial para la validación de resultados, la elaboración de diagramas de programación y la comunicación técnica entre profesionales del área. Por ello, a continuación, se presentan y describen los principales conceptos operativos y técnicos que constituyen la base terminológica del presente estudio.

Sistema de control automático

También se conoce como sistema automatizado, el cual se define como un dispositivo que logra funcionar por sí sólo, el mismo que se encuentra conformado por los siguientes elementos: red eléctrica, controladores lógicos programables o relés, generadores de señal y actuadores (Rodríguez, Cerdá y Bezos, 2022, pp. 2, 7, 313).

Relé programable

El relé programable es un dispositivo electrónico que representa al cerebro de un sistema de control automático (Estrella y Panduro, 2023, p. 14). Para la programación de dicho relé, se emplea un software de simulación el mismo que trabaja en lenguaje ladder. El relé posee en su estructura básica los siguientes elementos: una entrada de energía, un CPU (Unidad Central de Procesamiento) y una cantidad determinada de entradas y salidas físicas (Del Águila y Haquiwara, 2022, p. 6; Cucat, 2020, pp. 16-17). En la figura 2, se puede observar un relé programable cuya alimentación trabaja con un voltaje entre 100 – 240 VCA, tiene ocho (8) entradas ($I_1, I_2, \dots, I_8$) y cuatro (4) salidas físicas ($Q_1, Q_2, \dots, Q_4$) (Estrella y Panduro, 2023, p. 14; Gómez y Huayas, 2024, p. 7). Además, el relé posee un display el cual permite visualizar la información transferida desde una PC (computadora personal). El punto de conexión de programación, posee un puerto de comunicación tipo COM, en el cual se conecta el cable de transmisión de datos.

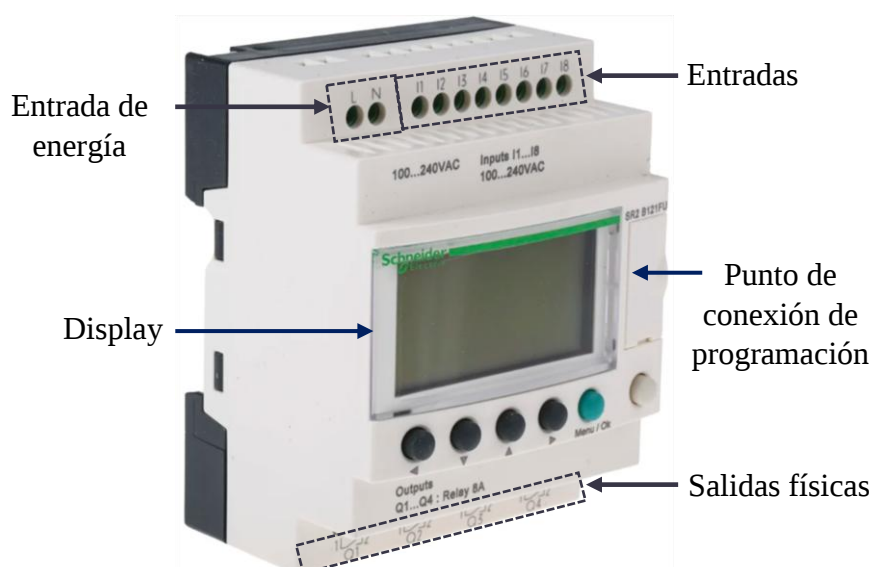


Figura 2. Relé programable con ocho entradas y cuatro salidas físicas.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 14.

Cable de transmisión de datos

Este dispositivo, sirve para hacer el traspaso de datos desde una PC (computadora personal) al relé programable, el mismo que acopla a dos puertos: COM y USB, los cuales se enlazan al relé programable y a la PC, respectivamente (Estrella y Panduro, 2023, p. 16) (figura 3).



Figura 3. Cable de transmisión de datos entre una PC y el relé programable.

Fuente: Elaboración propia.

Entradas y salidas físicas de un relé programable

Las entradas y salidas físicas de un relé programable, se representan en el software de simulación como contactos (NA o NC) y bobinas, respectivamente; las cuales se pueden conectar correspondientemente a los pulsadores y a los actuadores (electrobombas, electroválvulas, ventiladores, etc.) (Gómez y Huayas, 2024, pp. 9-10).

Contacto normalmente abierto (NA)

El contacto NA es conocido como normalmente abierto, debido a que en su situación normal no permite el paso de energía (Estrella y Panduro, 2023, p. 17). Su simbolización en físico y en el programa de computador del relé, se indican en la figura 4.

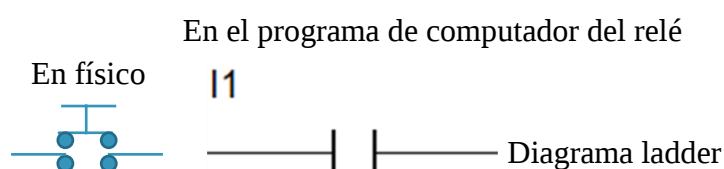


Figura 4. Simbolización del contacto NA.

Fuente: Elaboración propia.

Contacto normalmente cerrado (NC)

Este contacto trabaja de forma inversa al contacto NA; ya que, en su posición normal, si admite el flujo de carga eléctrica (Gómez y Huayas, 2024, p. 9). Su simbolización en físico y en el programa de computador del relé, se indican en la figura 5.

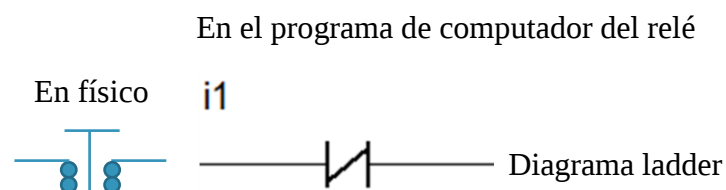


Figura 5. Simbolización del contacto NC.

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama ladder o lógica de contactos

En la actualidad, es el lenguaje con el cual trabajan los programas de computadoras para los controladores lógicos y es muy similar a un diagrama eléctrico de lógica cableada. Un diagrama ladder está conformado por un número determinado de contactos, los cuales permiten el encendido o apagado de una salida (Gómez y Huayas, 2024, p. 8). En la figura 6, se puede observar un diagrama ladder para prender y temporizar a las salidas Q1 y Q2 de un relé programable.

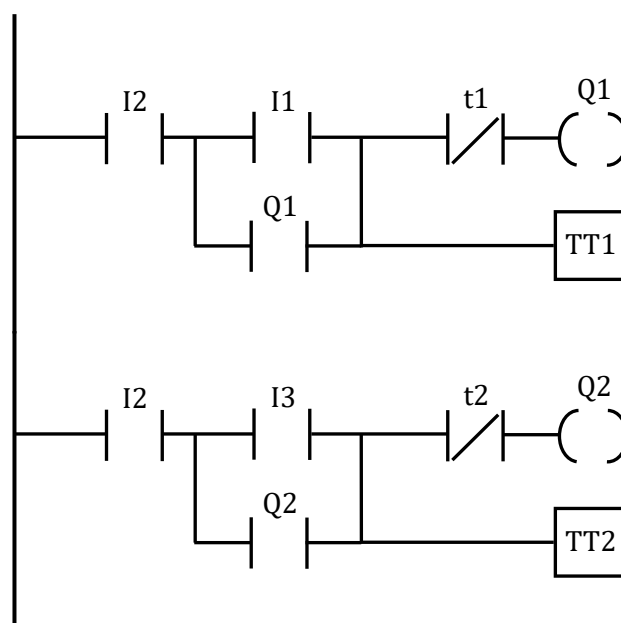


Figura 6. Diagrama ladder para prender y temporizar a las salidas Q1 y Q2 de un relé programable.

Fuente: Elaboración propia.

Al momento que se presiona el pulsador I1, se prende la salida Q1 y se energiza el temporizador TT1, iniciándose de este modo el conteo del tiempo que se encontrará prendida la salida Q1. En el instante que TT1 termina de contabilizar este tiempo, el contacto t1 se abre apagando a Q1. Al instante que se presiona el pulsador I3, se prende la salida Q2 y se energiza el temporizador TT2, iniciándose de esta manera el conteo del tiempo que estará prendida la salida Q2. En el momento que el temporizador TT2 termina de contar este tiempo, el contacto t2 se abre apagando a la salida Q2. Si en caso se presenta alguna situación imprevista, en ese mismo instante se puede presionar el pulsador I2 apagando a las salidas Q1 y Q2.

Temporizadores

Los temporizadores son componentes internos de un relé programable y cumplen la función de contabilizar el tiempo de funcionamiento de los actuadores (motores eléctricos, electrobombas, compresores, electroválvulas, etc.). Un temporizador se simboliza en el software de programación del relé mediante la letra T con el número respectivo y además posee dos partes: la bobina y los contactos (estos son NA y NC) (Estrella y Panduro, 2023, p. 19).

Caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal

Es el caudal de llenado o flujo volumétrico que produce la electrobomba de llenado (EBL). Se denota como Q_E y se mide en m^3/s o L/min (Mott, 2015, p. 120).

Caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal

Es el caudal de vaciado o flujo volumétrico que produce la electrobomba de vaciado (EBV). Se denota como Q_S y se mide en m^3/s o L/min (Mott, 2015, p. 120). Cabe mencionar que Q_E y Q_S , representan parámetros en las ecuaciones (14) y (15); es decir, estas cantidades se mantendrán constantes cuando se realicen las operaciones de llenado y vaciado.

Variables de control automático

Se refieren específicamente a la condición de las entradas y a la situación de las bobinas internas y las salidas físicas que se usan en el relé programable, las mismas que se describen seguidamente:

- ✓ *Condición de las entradas del relé programable donde se enchufan a los pulsadores I1 e I2*

Representan a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran correspondientemente la situación (abierto o cerrado) de las entradas 1 y 2 del relé programable (Chong y Ferreyra, 2023, pp. 32-33; Estrella y Panduro, 2023, p. 20).

- ✓ *Condición de las entradas del relé programable donde se enchufan a los pulsadores I3 e I4*

Representan a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran correspondientemente la situación (abierto o cerrado) de las entradas 3 y 4 del relé programable (Chong y Ferreyra, 2023, pp. 32-33; Estrella y Panduro, 2023, p. 20).

- ✓ *Estado de la bobina interna M1*

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (encendido o apagado) de la bobina interior M1 del relé programable, la cual cumple la función de energizar o encender a Q1 y TT1 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Gómez y Huayas, 2024, p. 15).

- ✓ *Estado del temporizador TT1*

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (energizado o desenergizado) del temporizador TT1, el mismo que tiene la función de contabilizar el tiempo que se encontrará encendida la salida física Q1 (Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Gómez y Huayas, 2024, p. 18).

✓ *Estado de la salida física Q1*

Representa a las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran el estado (apagado o encendido) de la salida física del relé programable donde se enchufa a la electrobomba de llenado (EBL) (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

✓ *Estado de la bobina interna M2*

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (encendido o apagado) de la bobina interna M2 del relé programable, la cual tiene la finalidad de encender a Q2 y TT2 (Chong y Ferreyra, 2023, p. 31; Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

✓ *Estado del temporizador TT2*

Se refiere a las cantidades binarias (0 o 1) que muestran la situación (energizado o desenergizado) del temporizador TT2, el cual tiene la finalidad de contabilizar el tiempo que se encontrará encendida Q2 (Estrella y Panduro, 2023, p. 20; Chong y Ferreyra, 2023, p. 34; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

✓ *Estado de la salida física Q2*

Representa a las cantidades binarias (0 o 1), las cuales muestran la situación (apagado o encendido) de la salida física del relé programable donde se enchufa a la electrobomba de vaciado (EBV) (Chong y Ferreyra, 2023, p. 33; Honorio y Molina, 2023, p. 19).

Enclavamiento o retención

Es una forma de encender o energizar a una bobina interna o salida física de un relé programable, la misma que se mantendrá en esta situación durante todo el tiempo que se requiera (Estrella y Panduro, 2023, p. 18). La bobina se puede prender generándose una señal, para lo cual es necesario presionar un pulsador NA, el mismo que debe conectarse a una entrada del relé programable.

En las figuras 7 y 8, se puede ver que para prender a la bobina M1, inicialmente, se debe apretar el pulsador de inicio I1 (NA), de este modo el contacto de la bobina interna M1 se enclava admitiendo el flujo de carga eléctrica hacia la bobina M1. Para apagar a la bobina M1 en el momento que sea necesario, bastará con presionar el pulsador de paro o stop I2(NC), imposibilitando de este modo el flujo de energía hacia la bobina M1. Cabe mencionar que el pulsador I2, realmente (en físico) es un contacto normalmente cerrado; sin embargo, en el programa de computadora del relé se le representa como un contacto normalmente abierto.

En relación a la figura 7, se obtiene la siguiente equivalencia para el enclavamiento o retención de M1:

$$I2 \times M1 + I1 = M1. \quad (19)$$

Como los contactos I2 y M1 están conectados en serie, sus cantidades binarias se multiplican, es decir: $I2 \times M1$. Ahora, como la serie de los contactos I2 y M1, se encuentra conectada en paralelo al contacto I1; entonces, se obtiene: $I2 \times M1 + I1$.

En este sentido, $I2 \times M1 + I1$, resulta igual al estado de la bobina M1. De esta forma es que se deduce la ecuación (19).

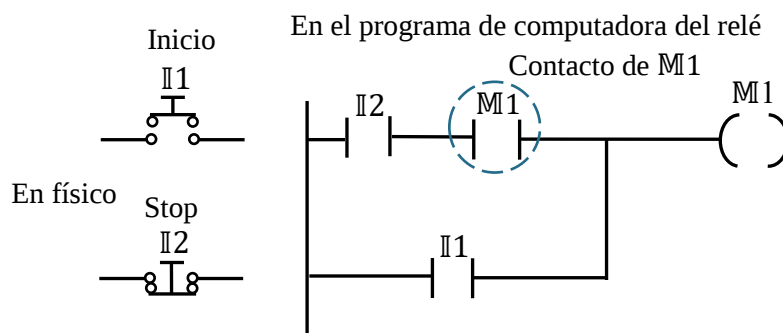


Figura 7. Representación del enclavamiento de la bobina M1.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 19.

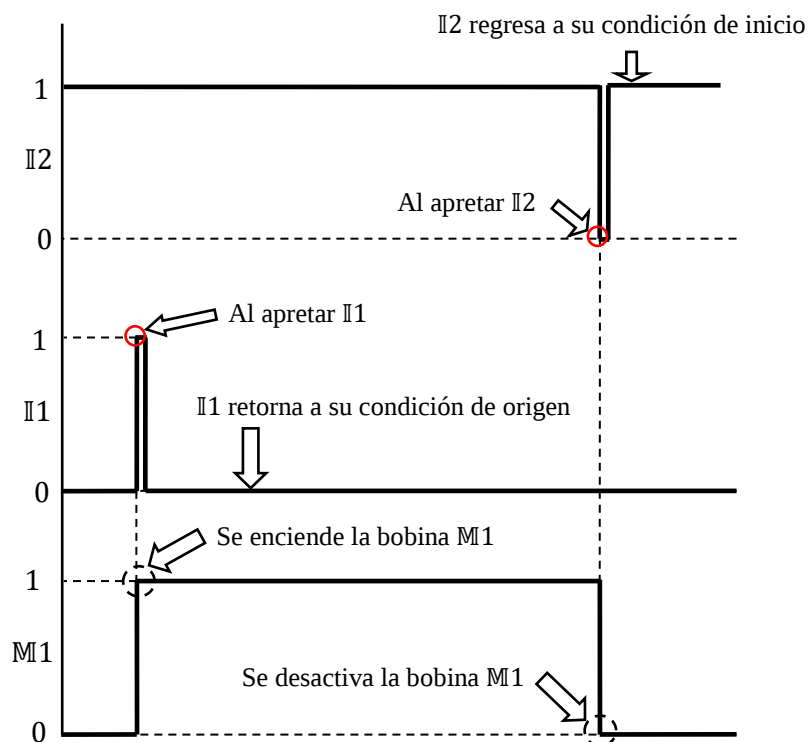


Figura 8. Representación gráfica del estado de los elementos de un enclavamiento.

Fuente: Estrella y Panduro, 2023, p. 19.

El recorrido teórico desarrollado en este primer capítulo ha permitido establecer un marco conceptual sólido sobre el cual se edifica el diseño y la implementación del sistema automatizado propuesto. La revisión de antecedentes nacionales ha evidenciado tanto los avances logrados en el control automático de procesos hidráulicos como las limitaciones que aún persisten, especialmente en lo referido a tanques cilíndricos horizontales, cuya geometría plantea retos específicos en el cálculo y monitoreo del volumen de líquido.

Asimismo, la incorporación de fundamentos de física, matemáticas aplicadas y automatización ha permitido articular los conceptos de balance de masa, caudal, nivel y tiempo con los principios de control lógico programado. Esta integración es esencial para entender cómo un fenómeno físico puede ser modelado, simulado y gestionado mediante dispositivos electrónicos inteligentes, como los relés programables.

La claridad terminológica alcanzada en esta etapa también representa un logro fundamental, pues dota al lector de un lenguaje técnico común que facilitará la

comprensión de las secciones siguientes, especialmente aquellas que implican el desarrollo del algoritmo de control, la lógica ladder y la implementación práctica del sistema.

En síntesis, este capítulo no solo proporciona el conocimiento necesario para abordar con rigor la solución propuesta, sino que también ofrece una mirada crítica sobre el estado actual de la automatización aplicada al control de líquidos. De esta manera, se establece una conexión coherente entre la teoría y la práctica, entre el saber y el hacer, que orientará el resto del desarrollo investigativo.

PARTE II

FORMULACIÓN, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Una vez establecidos los fundamentos teóricos y conceptuales que sustentan el presente estudio, esta segunda parte se enfoca en la formulación rigurosa del problema de investigación y en el diseño metodológico que orienta su desarrollo. En esta etapa se define con precisión qué se investiga, cómo se investiga y bajo qué criterios técnicos y científicos se validan los resultados.

El punto de partida es la formulación de la hipótesis general y las hipótesis específicas que guían el proceso investigativo. Estas suposiciones planteadas de forma lógica permiten establecer relaciones entre las variables que intervienen en el comportamiento del sistema automatizado propuesto: nivel de líquido, caudal, tiempo de llenado y vaciado, entre otras. La identificación y operacionalización de estas variables es clave para garantizar una medición objetiva y replicable de los resultados.

Seguidamente, se detalla el tipo de investigación adoptado, el diseño correlacional propuesto, la población objeto de estudio, la muestra representativa, así como los criterios de inclusión y exclusión aplicados. También se abordan los instrumentos, equipos y procedimientos necesarios para la recolección de datos, y se describen los protocolos éticos que aseguran la integridad del proceso investigativo.

Esta parte proporciona el puente entre la teoría y la implementación práctica, al traducir el conocimiento conceptual en una estrategia sistemática de investigación. El diseño metodológico no solo garantiza la validez y confiabilidad de los resultados, sino que también permite que el proceso sea replicable y útil como modelo para futuras investigaciones similares en el campo de la automatización industrial.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

Toda investigación científica parte de una inquietud estructurada: una pregunta que busca respuesta mediante la observación sistemática, el análisis riguroso y la comprobación empírica. Este capítulo aborda justamente ese núcleo lógico del estudio: la formulación de la hipótesis y la identificación de las variables que intervienen en el fenómeno investigado.

En el caso específico del presente trabajo —centrado en el diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales—, la hipótesis actúa como una proposición tentativa que busca predecir los efectos que tendrá la automatización sobre el comportamiento del nivel de líquido, el tiempo de operación y la eficiencia general del sistema. Esta afirmación, que será puesta a prueba mediante la aplicación práctica del sistema propuesto, establece relaciones claras entre variables cuantificables, permitiendo así la validación o refutación de los supuestos iniciales.

Para que esta hipótesis pueda ser contrastada con datos reales, es indispensable definir con claridad las variables involucradas. Este capítulo detalla tanto las variables independientes, intervinientes y las dependientes, en el control automático y en las operaciones de llenado y vaciado. A su vez, se operacionalizan estas variables, es decir, se traducen en indicadores medibles y observables que facilitan su seguimiento experimental.

La correcta formulación de la hipótesis y la precisión en la definición de variables no solo orientan el diseño metodológico, sino que aseguran la coherencia interna de toda la investigación. Así, este capítulo constituye una pieza clave para garantizar la validez científica del estudio y preparar el terreno para su implementación experimental.

Formulación de la hipótesis

La hipótesis constituye el eje lógico que orienta toda investigación científica. En el contexto de este estudio, su función es anticipar el efecto que tendría la implementación de un sistema automatizado —basado en un relé programable— sobre el control del llenado y vaciado de líquidos en un tanque cilíndrico horizontal. Esta hipótesis será

contrastada experimentalmente mediante la aplicación práctica del sistema y la evaluación de sus resultados operativos.

Dado que el objetivo principal del proyecto es desarrollar una solución automatizada eficiente, segura y replicable, se ha formulado una hipótesis general que considera tanto los requerimientos técnicos del sistema como las condiciones funcionales mínimas necesarias para su operación efectiva.

Hipótesis general

“El sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal operará de forma eficiente y controlada si es implementado mediante cuatro pulsadores (dos NA y dos NC), dos electrobombas y un relé programable que cuente con al menos cuatro entradas y dos salidas físicas, permitiendo que las electrobombas funcionen adecuadamente durante el tiempo requerido para llenar o vaciar una determinada cantidad de líquido en el tanque cilíndrico horizontal”.

Esta hipótesis parte del supuesto de que un relé programable con dichas características es suficiente para gestionar las condiciones básicas del proceso: el control del tiempo de funcionamiento de dos electrobombas y la ejecución lógica de la secuencia de operaciones necesarias para el llenado y vaciado del tanque.

Las cuatro entradas físicas se consideran necesarias para generar las señales que prenderán y apagarán a las electrobombas mediante el accionamiento de los pulsadores: por ejemplo, para prender a la electrobomba de llenado es necesario que se genere una señal presionando un pulsador con contacto NA, en ese mismo instante también se activará a un temporizador que controlará el tiempo de funcionamiento de esta electrobomba; sin embargo, en cualquier momento que se requiera se podrá accionar un pulsador con contacto NC para apagarla. Del mismo modo, se debe proceder si en caso se desea prender la electrobomba de vaciado. Por tanto, las **dos salidas físicas** del relé programable son fundamentales para activar los actuadores del sistema, que en este caso se representan por las dos electrobombas.

Esta hipótesis será verificada a través de pruebas funcionales del sistema, en las que se observará si se logra controlar de manera precisa el comportamiento del líquido

dentro del tanque bajo condiciones simuladas y reales. El éxito o fracaso del modelo permitirá confirmar o refutar esta hipótesis, dando paso a conclusiones técnicas sobre su viabilidad.

Hipótesis específicas

Con base en la hipótesis general formulada, se establecen las siguientes hipótesis específicas, que permiten descomponer el fenómeno de estudio en relaciones concretas entre variables físicas y lógicas del sistema automatizado. Estas hipótesis específicas guiarán el análisis y validación empírica del comportamiento del sistema en cada una de sus funciones principales.

1. Existe una relación directa entre el volumen de líquido y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

Esta hipótesis parte del principio geométrico que rige los tanques cilíndricos horizontales, donde la relación entre nivel y volumen no es lineal, pero puede ser descrita mediante una fórmula matemática específica. Esta relación es clave para que el sistema automatizado pueda calcular de forma precisa el volumen contenido a partir de la observación del nivel de líquido.

2. Existe relación entre el volumen final de líquido, el nivel inicial de líquido y los volúmenes correspondientes a las operaciones de llenado y vaciado.

El comportamiento dinámico del líquido en el tanque depende de las condiciones iniciales y del control ejercido durante el proceso. Esta hipótesis plantea que, al conocer el nivel inicial y aplicar caudales definidos durante un tiempo determinado, es posible predecir con exactitud el volumen final alcanzado.

3. Existe una relación funcional entre el tiempo de operación y los volúmenes correspondientes a las operaciones de llenado y vaciado.

Esta hipótesis plantea que el tiempo de llenado o vaciado está directamente influenciado por el caudal de entrada o salida, y por la geometría del tanque. La automatización del sistema permite controlar dicho tiempo de manera precisa mediante el uso de temporizadores programables.

4. **El circuito lógico más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un tanque cilíndrico horizontal es un diagrama de tipo ladder.**
Esta hipótesis se fundamenta en la capacidad del diagrama ladder para representar, de forma clara y estructurada, la lógica secuencial de los procesos de control. Además, su compatibilidad con relés programables lo convierte en una herramienta eficaz y ampliamente utilizada en la automatización industrial.
5. **Existe una relación lógica entre la condición de las entradas del sistema, el estado de las bobinas internas, el comportamiento de los temporizadores y el estado final de cada una de las salidas físicas del relé programable.**
Esta hipótesis establece que el sistema automatizado funciona como una red lógica interdependiente, donde los estímulos externos (entradas) se traducen en acciones internas (activación de bobinas y temporizadores) que, a su vez, determinan las respuestas físicas del sistema (activación de las electrobombas). Esta coherencia entre entradas, procesos y salidas es la base del control automatizado.

Variables y su operacionalización

Para que una hipótesis pueda ser contrastada científicamente, es imprescindible identificar, categorizar y operacionalizar las variables involucradas en el fenómeno de estudio. Esto implica definir con precisión qué se va a medir, cómo se va a medir y bajo qué condiciones se observará su comportamiento.

En el presente estudio, las variables han sido organizadas en función de tres aspectos fundamentales del sistema: el control automático, la operación de llenado y la operación de vaciado. Cada uno de estos procesos involucra variables independientes (que se modifican), intervinientes (que influyen en las relaciones entre variables de entrada y salida) y dependientes (que responden al sistema).

A. En el control automático

✓ *Variables independientes:*

Se consideran las condiciones de las entradas físicas del relé programable, las cuales reciben señales provenientes de dispositivos como pulsadores. Específicamente, se identifican las siguientes entradas:

- I1 (NA): Pulsador de inicio de llenado.
- I2 (NC): Paro de emergencia o interrupción del llenado.
- I3 (NA): Pulsador de inicio de vaciado.
- I4 (NC): Paro de emergencia o interrupción del vaciado.

✓ *Variables intervinientes:*

Están representadas por los estados de los componentes internos del relé programable:

- M1 y M2: Bobinas de enclavamiento para mantener los estados activos de llenado o vaciado.
- TT1 y TT2: Temporizadores que controlan los tiempos de operación en función a la cantidad de líquido que se desea llenar o vaciar.

✓ *Variables dependientes:*

Son los estados de las salidas físicas que activan a los actuadores del sistema:

- Q1: Salida conectada a la electrobomba de llenado.
- Q2: Salida conectada a la electrobomba de vaciado.

La activación de estas salidas depende del estado lógico de las entradas, bobinas de enclavamiento y temporizadores.

B. En la operación de llenado

✓ *Variables independientes:*

- Nivel inicial de líquido: Altura de la superficie del líquido dentro del tanque al inicio del llenado.
- Volumen de llenado: Cantidad total de líquido que se desea agregar.

✓ *Variables intervinientes:*

- Volumen inicial de líquido: Volumen correspondiente al nivel inicial.
- Nivel final de líquido: Altura alcanzada al finalizar el proceso de llenado.

✓ *Variables dependientes:*

- Volumen final de líquido: Resultado de sumar el volumen de llenado al volumen inicial.
- Tiempo de llenado: Duración del proceso desde el inicio hasta alcanzar el volumen deseado, determinado por el caudal de entrada y controlado por el temporizador TT1.

C. En la operación de vaciado

✓ *Variables independientes:*

- Nivel inicial de líquido: Altura de la superficie del líquido dentro del tanque al iniciar el vaciado.
- Volumen de vaciado: Cantidad de líquido que se desea retirar del tanque.

✓ *Variables intervinientes:*

- Volumen inicial de líquido: Determinado a partir del nivel inicial.
- Nivel final de líquido: Nivel alcanzado tras concluir el vaciado.

✓ *Variables dependientes:*

- Volumen final de líquido: Resultado de restar el volumen de vaciado al volumen inicial.
- Tiempo de vaciado: Duración del proceso desde el inicio hasta alcanzar el volumen deseado, determinado por el caudal de salida y controlado por el temporizador TT2.

Esta estructura de variables establecerá relaciones claras en el control automático, el llenado y vaciado, facilitando la validación de las hipótesis planteadas.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología constituye el núcleo estructural de toda investigación científica, ya que define el camino que se debe seguir para alcanzar los objetivos propuestos, validar las hipótesis planteadas y garantizar la rigurosidad en el tratamiento del problema. En este capítulo se expone con claridad el enfoque metodológico adoptado, los criterios técnicos aplicados, así como los procedimientos de diseño, implementación, recolección y análisis de datos desarrollados durante la ejecución del proyecto.

Dado que el presente estudio busca diseñar e implementar un sistema automatizado para el control del llenado y vaciado de líquidos en un tanque cilíndrico horizontal, la metodología seleccionada responde a un enfoque **cuantitativo** y **diseño correlacional**, permitiendo observar, medir y controlar variables de manera objetiva. Este enfoque permite generar datos verificables sobre el comportamiento del sistema, antes y después de la automatización.

Asimismo, se describe detalladamente el tipo de investigación, la caracterización de la población y muestra, así como los instrumentos y equipos utilizados. Se incluye también el proceso de implementación del sistema, la programación del relé inteligente mediante diagrama ladder, y la disposición física de los componentes del sistema.

Finalmente, se abordan aspectos cruciales como la recolección de datos, los procedimientos de validación, el análisis estadístico básico y las consideraciones éticas que garantizaron un trabajo responsable, seguro y confiable.

Este capítulo establece, por tanto, el protocolo técnico y científico que sostiene la validez interna del estudio, y prepara el terreno para la presentación y discusión de los resultados obtenidos en los siguientes capítulos.

Tipo y diseño

En el desarrollo del presente libro, primeramente, se realizó un estudio de la ecuación general de balance de masa para procesos no reactivos, del lenguaje ladder y del ambiente del software Zelio Soft2 V5.4.2. A continuación, se programó en Microsoft

Excel 2023, la relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Posteriormente, se determinaron los componentes del sistema automatizado y se realizó la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en dicho tanque. Finalmente, se implementó el mencionado sistema y se realizaron las pruebas de funcionamiento. De esta manera, se indica que el presente trabajo tiene nivel aplicativo con enfoque cuantitativo y diseño correlacional. Los esquemas del diseño de investigación para el control automático, la operación de llenado y la operación de vaciado, se muestran en las figuras 9, 10 y 11, respectivamente.

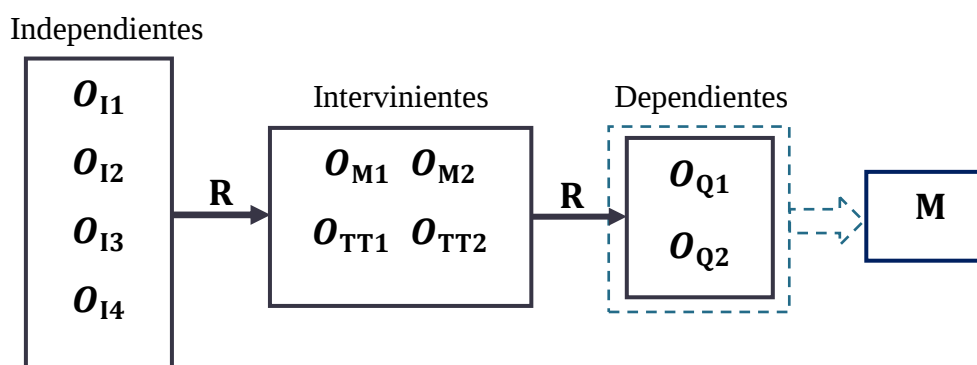


Figura 9. Esquema del diseño de investigación para el control automático.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{I1} , O_{I2} , O_{I3} , O_{I4} , O_{M1} , O_{M2} , O_{TT1} , O_{TT2} , O_{Q1} y O_{Q2} son las observaciones obtenidas en cada una de las diez variables (I1, I2, I3, I4, M1, M2, TT1, TT2, Q1 y Q2), respectivamente.

I1, I2, I3, I4 : condición de las entradas del relé programable que se conectan a los pulsadores I1, I2, I3 e I4 (variables independientes).

M1, M2 : estado de las bobinas internas M1 y M2 del relé programable (variables intervinientes).

TT1, TT2 : estado de los temporizadores TT1 y TT2 del relé programable (variables intervinientes).

Q1 : estado de la salida física del relé programable que se conecta a la electrobomba de llenado (EBL) (variable dependiente).

Q2 : estado de la salida física del relé programable que se conecta a la electrobomba de vaciado (EBV) (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

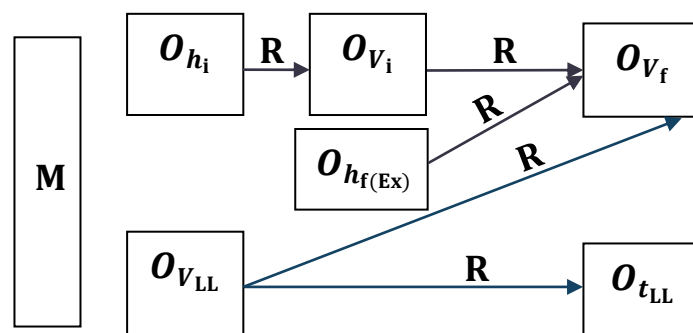


Figura 10. Esquema del diseño de investigación para el llenado.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{h_i} , $O_{V_{LL}}$, O_{V_i} , O_{h_f} , O_{V_f} y $O_{t_{LL}}$, son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (h_i , V_{LL} , V_i , h_f , V_f y t_{LL}), respectivamente.

h_i : nivel inicial de líquido (variable independiente).

V_{LL} : volumen de llenado (variable independiente).

V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).

$h_{f(EX)}$: nivel final de líquido (variable interviniente).

V_f : volumen final de líquido (variable dependiente).

t_{LL} : tiempo de llenado (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

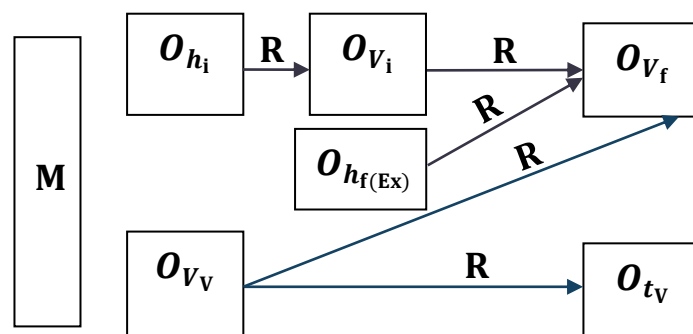


Figura 11. Esquema del diseño de investigación para el vaciado.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_{h_i} , O_{V_v} , O_{V_i} , O_{h_f} , O_{V_f} y O_{t_v} , son las observaciones obtenidas en cada una de las seis variables (h_i , V_v , V_i , h_f , V_f y t_v), respectivamente.

h_i : nivel inicial de líquido (variable independiente).

V_v : volumen de vaciado (variable independiente).

V_i : volumen inicial de líquido (variable interviniente).

$h_{f(Ex)}$: nivel final de líquido (variable interviniente).

V_f : volumen final de líquido (variable dependiente).

t_v : tiempo de vaciado (variable dependiente).

M : muestra.

R : relación entre las variables.

**Equipo para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo
en un tanque cilíndrico horizontal, antes de la implementación del sistema
automatizado**

Este equipo se encontraba deteriorado e inservible (figura 12), debido que no contaba con el visor mediante el cual se realizaba la medida del nivel de líquido en el tanque, tampoco con las electrobombas; lo cual imposibilitaba realizar el llenado y vaciado del líquido en forma automática en dicho tanque.



Figura 12. Tanque cilíndrico horizontal antes de la implementación del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

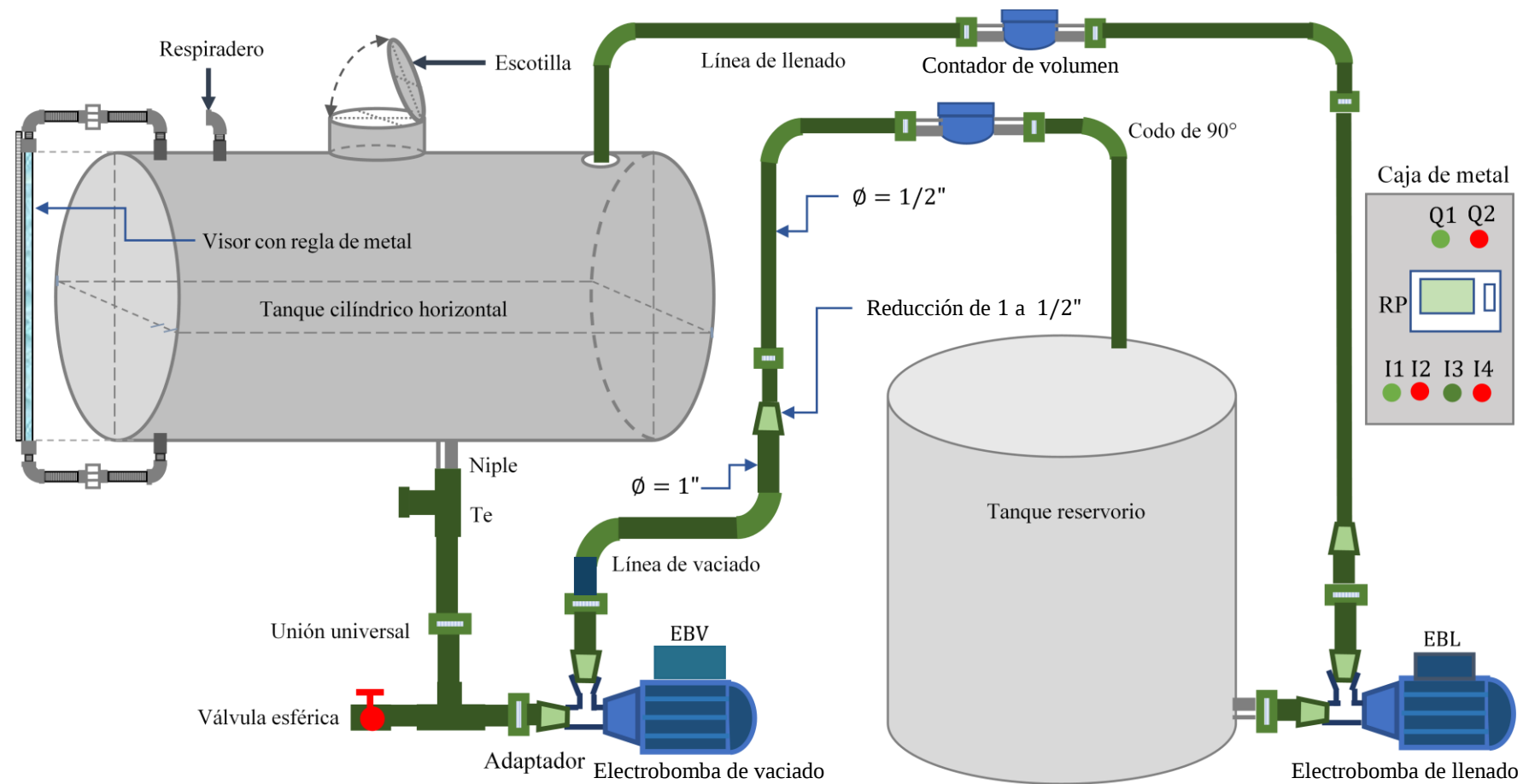


Figura 13. Propuesta de diseño para la implementación del sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales.

Fuente: Elaboración propia.

Propuesta de diseño para la implementación del sistema automatizado

Comparando las figuras 12 y 13, se puede observar que el sistema automatizado será implementado con los siguientes componentes: un relé programable (RP), una electrobomba de llenado (EBL), una electrobomba de vaciado (EBV), dos pulsadores rojos NC, dos pulsadores verdes NA, dos luces led, una llave térmica con su enchufe bipolar, una caja de metal donde se instalarán el relé programable con las luces led, los pulsadores y la llave térmica, un visor con regla graduada, una línea de llenado (conformada por tramos de tubería recta y accesorios, la electrobomba de llenado y un contador de volumen) y una línea de vaciado (conformada por tramos de tubería recta y accesorios, la electrobomba de vaciado y un contador de volumen).

El llenado del tanque cilíndrico horizontal, se realizará como se indica a continuación:

Observar el visor con regla graduada, para determinar la altura inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación (13) en Microsoft Excel 2023, es posible copiar en una celda el valor de h_i y determinar de forma automática el valor de V_i .

A continuación, es necesario escribir en otra celda el valor del volumen de líquido que se requiere llenar (V_{LL}). De este modo, aplicando las ecuaciones (14) y (16), se determinan el tiempo de llenado (t_{LL}) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente.

El valor del tiempo de llenado se programa en el relé, el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de llenado presionando el pulsador I1 (NA), lo cual hace que automáticamente el relé programable envíe un pulso eléctrico a la electrobomba de llenado (EBL), haciendo de este modo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led verde que también está enchufada a Q1), admitiendo de esta forma que el líquido que se encuentra dentro del tanque reservorio comience a circular por toda la línea de llenado hasta el tanque cilíndrico horizontal, durante todo el tiempo programado. En el momento que el temporizador culmine de contabilizar dicho tiempo, el relé programable enviará otro pulso eléctrico a la electrobomba de llenado

(EBL) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led verde). En algún instante que se necesite o suceda cualquier inconveniente, es posible presionar el pulsador rojo I2 (NC), desactivando a la electrobomba de llenado.

El vaciado del tanque cilíndrico horizontal, se realizará como se muestra a continuación:

Se debe inspeccionar dicho visor, para determinar la altura inicial de líquido en el tanque (h_i). Al tener programada la ecuación **(13)** en Microsoft Excel 2023, es posible anotar en una celda el valor de h_i y obtener de forma automática el valor de V_i .

A continuación, se debe copiar en otra celda el valor del volumen de líquido que se requiere vaciar (V_v). De este modo, aplicando las ecuaciones **(15)** y **(17)**, se determinan el tiempo de vaciado (t_v) y el valor teórico del volumen final de líquido $V_{f(T)}$, respectivamente.

El valor del tiempo de vaciado se programa en el relé, el cual tiene internamente un temporizador. Entonces, se inicia la operación de vaciado presionando el pulsador I3 (NA), en ese mismo instante el relé programable enviará un pulso eléctrico a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se prenda (esto se indicará al prenderse la luz led roja que también está enchufada a Q2), admitiendo de esta forma que el líquido que se encuentra en el tanque cilíndrico horizontal comience a moverse por toda la línea de vaciado hasta el tanque reservorio, durante todo el tiempo programado. Cuando el temporizador culmine de contabilizar dicho tiempo, el relé enviará otro pulso eléctrico a la electrobomba de vaciado (EBV) haciendo que se apague (esto se indicará al apagarse la luz led roja). En el instante que se requiera o suceda algún imprevisto, será posible presionar el pulsador rojo I4 (NC), desactivando a la electrobomba de vaciado.

Cabe mencionar que los pulsadores I2 e I4, en realidad son contactos normalmente cerrados (NC); pero, en el programa de computadora del relé son representados como contactos normalmente abiertos (NA). También, al finalizar dichas operaciones, se debe realizar nuevamente la inspección al visor para medir el nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$), cuyo valor se debe reemplazar en la ecuación **(18)** para obtener el valor experimental del

volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$). En la figura 14, se muestra en detalle los componentes que conforman el sistema automatizado.

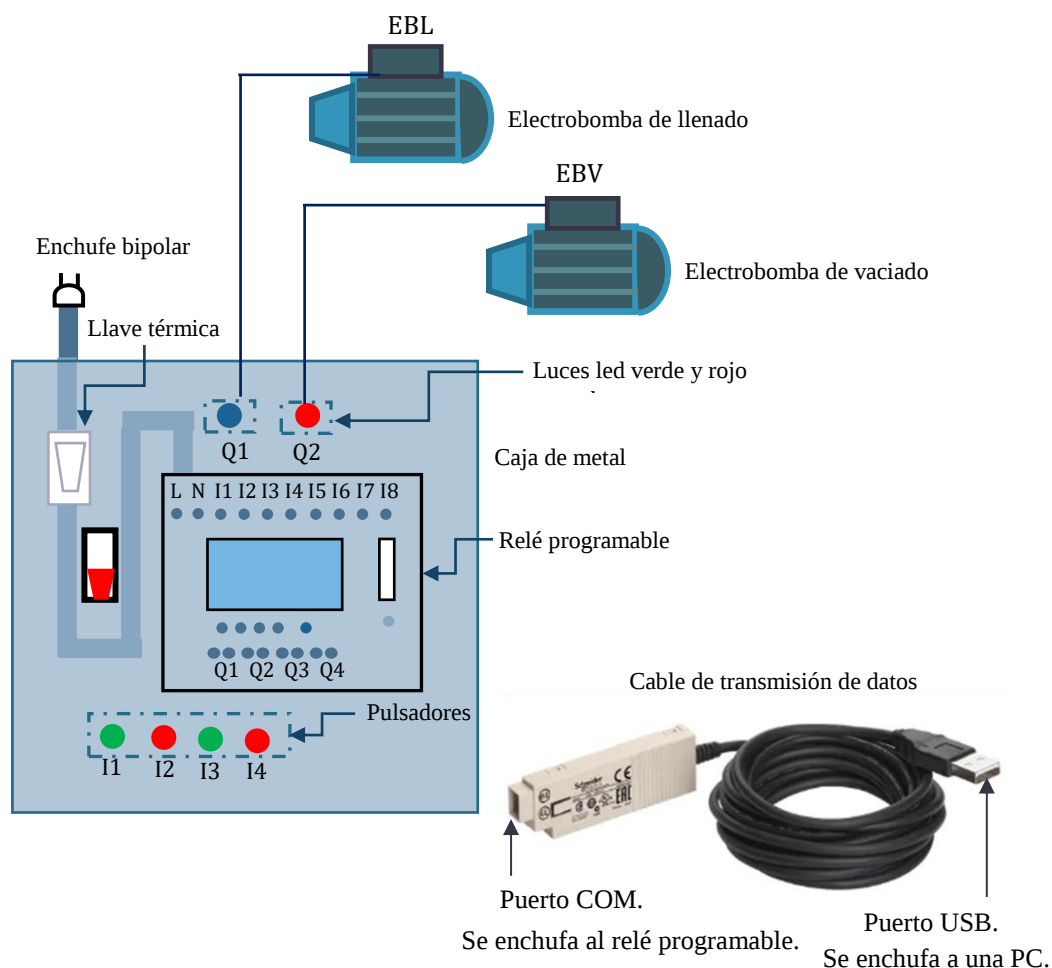


Figura 14. Sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

Elaboración del diagrama ladder

El diagrama ladder para la simulación del control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal, se ha elaborado teniendo en cuenta los siguientes procedimientos:

Enclavamiento de la bobina M1

Consiste en prender a la bobina interna M1, para lo cual necesariamente se tiene que presionar el pulsador verde I1 (NA), de este modo el contacto de M1 se enclavará permitiendo el flujo eléctrico hacia la bobina M1 (figura 15).

Prendido del temporizador TT1 y de la salida física Q1.

Al momento que se prende a la bobina M1, su contacto correspondiente se queda enclavado permitiendo el flujo eléctrico hacia TT1 y Q1. Como la electrobomba de llenado se debe enchufar a la salida física Q1; entonces, al prenderse TT1 se inicia la contabilización del tiempo que permanecerá encendida la electrobomba de llenado (figura 15). El valor de dicho tiempo se tiene que escribirlo en la ventana de parámetros del temporizador TT1 (figura 17).

Apagado del temporizador TT1 y de la salida física Q1.

En el momento que el TT1 acabe de contabilizar el tiempo de llenado, el contacto t1 se abrirá impidiendo el paso de energía hacia la bobina M1; provocando que automáticamente TT1 y Q1 se apaguen (figura 15).

Enclavamiento de la bobina M2

Consiste en prender a la bobina interna M2, para lo cual necesariamente se debe presionar el pulsador verde I3 (NA), de esta manera el contacto de M2 se enclavará permitiendo el flujo eléctrico hacia la bobina M2 (figura 16).

Prendido del temporizador TT2 y de la salida física Q2

Al momento que se prende a la bobina M2, su contacto correspondiente se queda enclavado haciendo posible el flujo eléctrico hacia TT2 y Q2. Como la electrobomba de vaciado se debe enchufar a Q2; en consecuencia, al prenderse TT2 se da inicio a la contabilización del tiempo que permanecerá encendida la electrobomba de vaciado (figura 16). El valor de dicho tiempo se tiene que anotar en la ventana de parámetros del temporizador TT2 (figura 17).

Apagado del temporizador $TT2$ y de la salida física $Q2$

En el momento que el temporizador $TT2$ culmine de contabilizar el tiempo de vaciado, el contacto $t2$ se abrirá impidiendo el paso de energía hacia la bobina $M2$; provocando de esta forma que automáticamente el temporizador $TT2$ y la salida física $Q2$ se apaguen (figura 16).

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

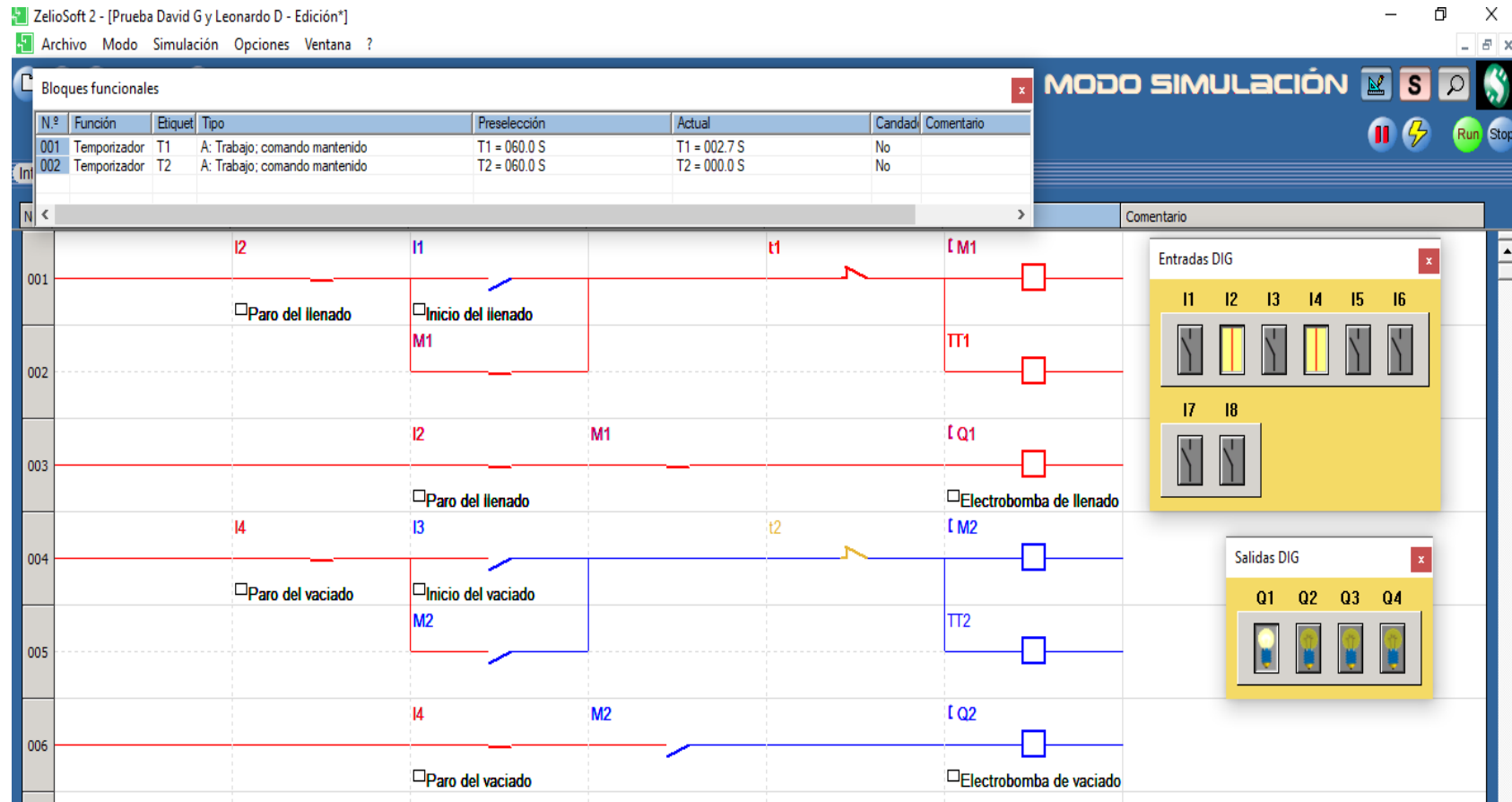


Figura 15. Diseño y simulación del prendido de la bobina M1, del temporizador TT1 y de la salida física Q1.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

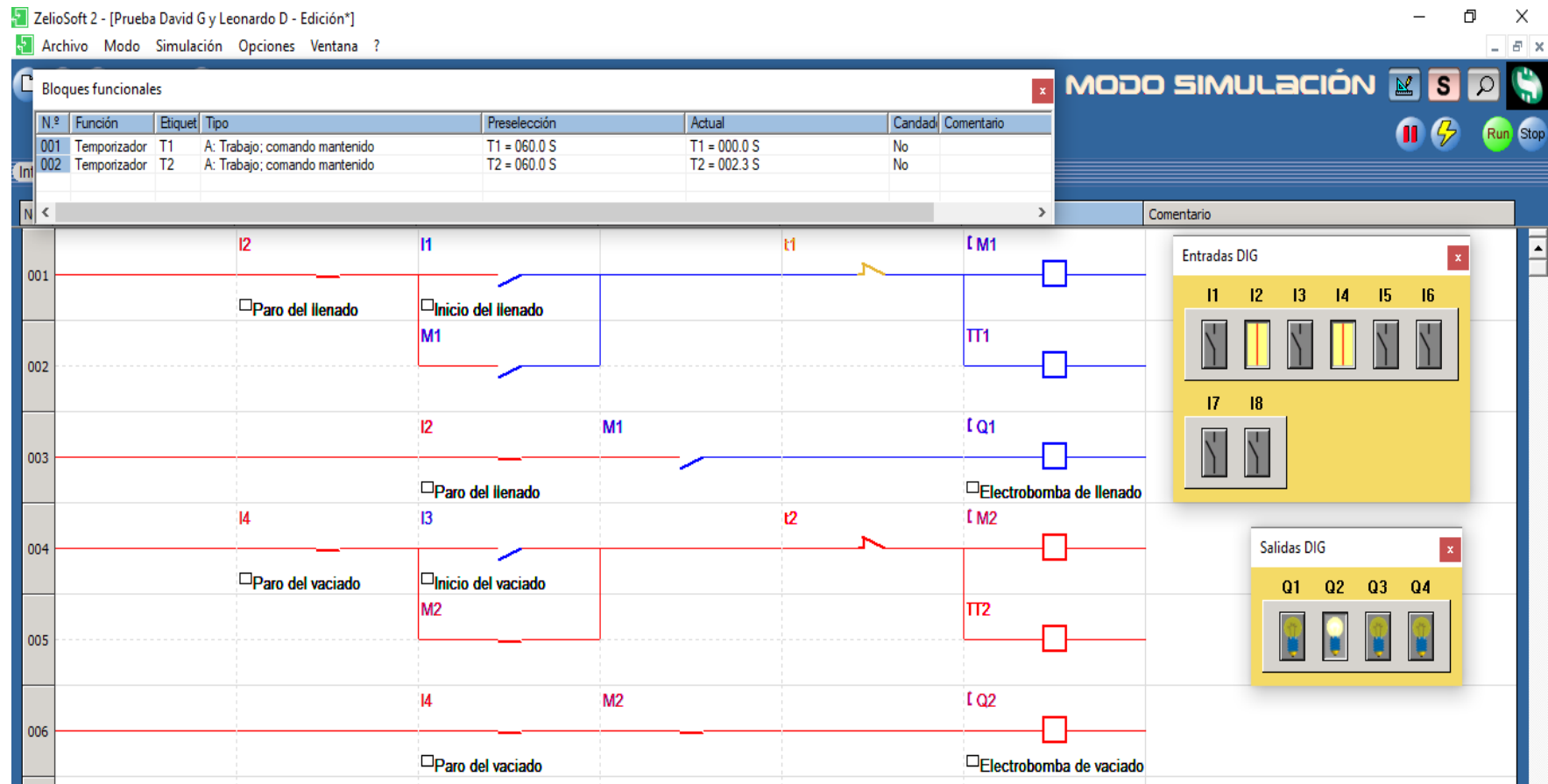


Figura 16. Diseño y simulación del prendido de la bobina M2, del temporizador TT2 y de la salida física Q2.

Fuente: Elaboración propia.

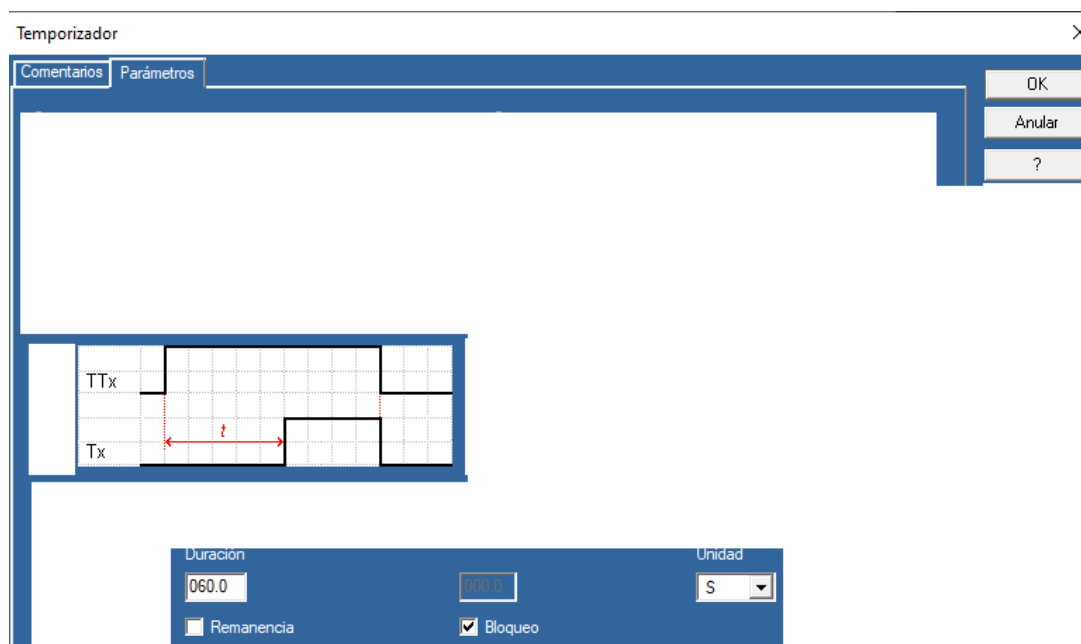


Figura 17. Ventana de parámetros del temporizador.

Fuente: Elaboración propia.

Orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable

En concordancia a lo descrito en la elaboración del diagrama ladder, se estableció el siguiente orden de conexiones para las entradas y salidas físicas del relé programable:

Los pulsadores I1 (NA) e I2 (NC), se enchufan a las entradas 1 y 2 del relé programable, respectivamente.

Los pulsadores I3 (NA) e I4 (NC), se enchufan a las entradas 3 y 4 del relé programable, respectivamente.

A la salida física Q1 del relé programable, se enchufan la electrobomba de llenado (EBL) y la luz led verde.

A la salida física Q2 del relé programable, se enchufan la electrobomba de vaciado (EBV) y la luz led roja.

También, es preciso indicar que los puertos COM y USB del cable de transmisión de datos, se tienen que enchufar al relé programable y a una PC (computadora personal), respectivamente.

Relación entre la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas, el estado de los temporizadores y el estado de las salidas físicas del relé programable

El diagrama ladder elaborado, también se puede representar por medio de un sistema de ecuaciones, las cuales relacionan a la condición de las entradas (I1, I2, I3, e I4), el estado de las bobinas internas (M1 y M2) y el estado de las salidas físicas (Q1 y Q2) del relé programable.

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = M1. \quad (20)$$

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = TT1. \quad (21)$$

$$I2 * M1 = Q1. \quad (22)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = M2. \quad (23)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = TT2. \quad (24)$$

$$I4 * M2 = Q2. \quad (25)$$

La ecuación (20), indica la relación entre la condición de las entradas I1(NA) e I2 (NC), el estado del contacto t1 (NC) y el estado de la bobina M1. En este sentido, para que M1 sea encendida y su contacto correspondiente permanezca enclavado, obligatoriamente los contactos I2 y t1 deben estar cerrados y previamente se tiene que haber presionado el pulsador I1.

La ecuación (21), indica la relación entre la condición de las entradas I1(NA) e I2 (NC), el estado del contacto t1 (NC), el estado de la bobina M1 y el estado de la bobina del temporizador TT1. En consecuencia, para que la bobina del temporizador TT1 permanezca prendida, obligatoriamente los contactos I2 y t1 tienen que encontrarse cerrados y previamente se debe hacer el prendido de la bobina M1 para que su contacto respectivo permita el flujo eléctrico hacia la bobina del temporizador TT1.

La ecuación (22), da a conocer la relación entre la condición de la entrada I2, el estado de la marca M1 y el estado de la salida física Q1. En consecuencia, para que la salida física Q1 esté encendida, obligatoriamente los contactos I2 y M1 tienen que encontrarse cerrados.

La ecuación (23), indica la relación entre la condición de las entradas I3(NA) e I4 (NC), el estado del contacto t2 (NC) y el estado de la bobina M2. En consecuencia, para que M2 sea encendida y su contacto correspondiente permanezca enclavado, obligatoriamente los contactos I4 y t2 deben estar cerrados y previamente se tiene que presionarse el pulsador I3.

La ecuación (24), indica la relación entre la condición de las entradas I3(NA) e I4 (NC), el estado del contacto t2 (NC), el estado de la bobina M2 y el estado de la bobina del temporizador TT2. En consecuencia, para que la bobina del temporizador TT2 se encuentre prendida, obligatoriamente los contactos I4 y t2 se tienen que encontrarse cerrados y previamente se debe haberse prendido a la bobina M2 para que su contacto respectivo permita el flujo eléctrico hacia la bobina del temporizador TT2.

Como el estado de las bobinas M1 y M2, serán los mismos que el de sus contactos respectivos; entonces, al relacionar las ecuaciones (20) con (22) y (23) con (25), se deducen las ecuaciones que relacionan a la condición de las entradas, el estado de las bobinas internas y el estado de las salidas físicas del relé programable, es decir:

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = Q1. \quad (26)$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = Q2. \quad (27)$$

Implementación del sistema automatizado

En relación a las figuras 13 y 14, se ha realizado la implementación del sistema automatizado en el equipo para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales.



Figura 18. Equipo para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales, después de la implementación del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 19 y 20, se muestra en mayor detalle las vistas reales de los componentes del sistema automatizado y de las líneas de vaciado y llenado, respectivamente.

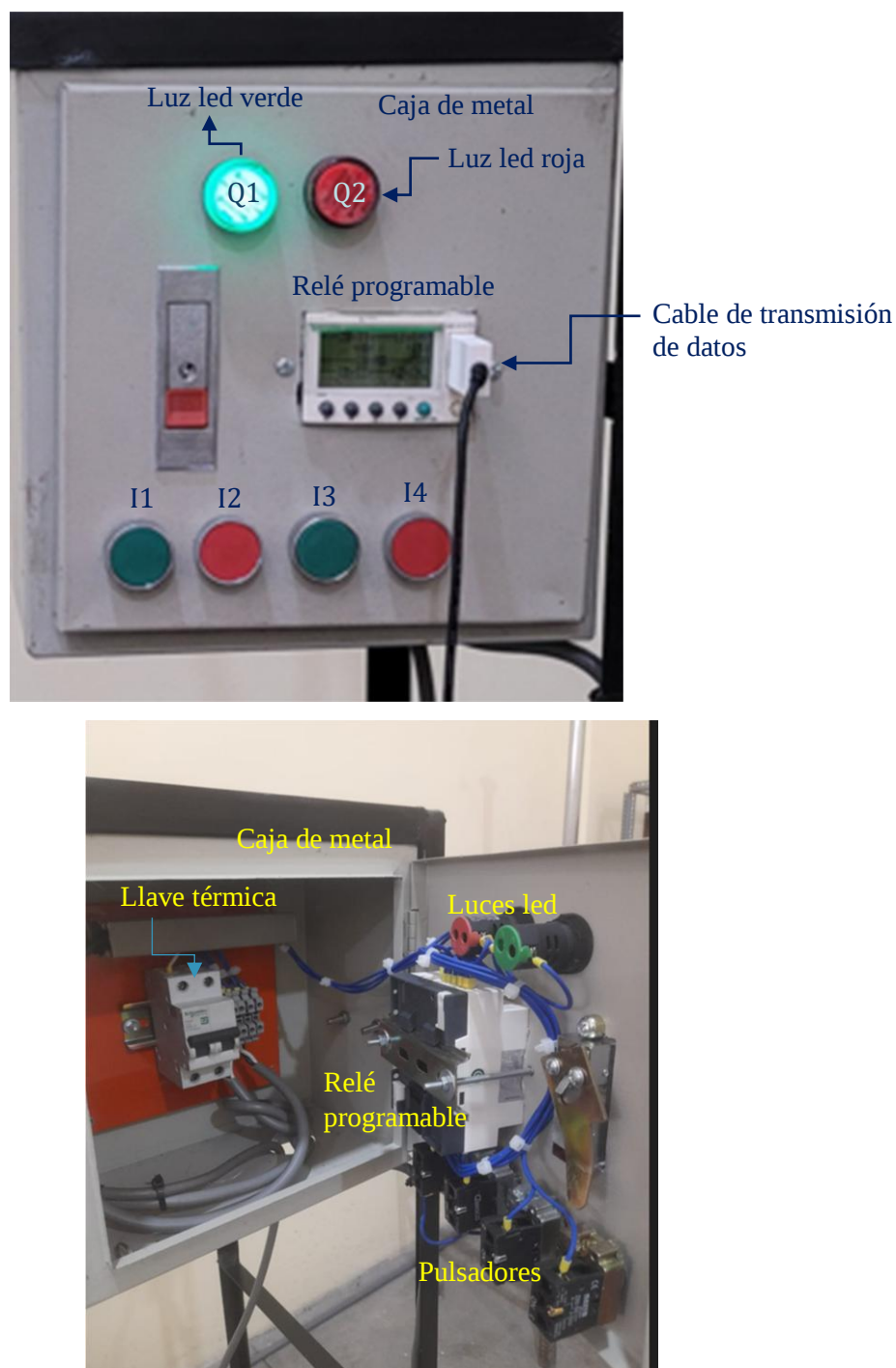


Figura 19. Vistas reales de los componentes principales del sistema automatizado.

Fuente: Elaboración propia.

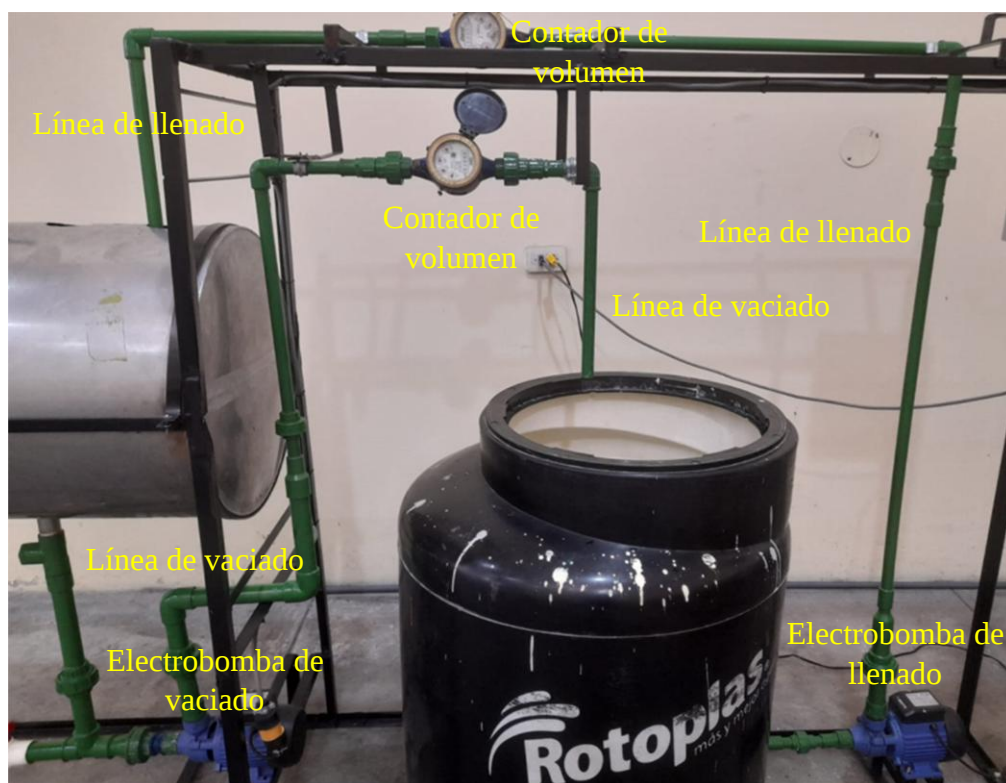


Figura 20. Vistas reales de las líneas de vaciado y llenado.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, en la figura 21 se da a conocer el esquema de instalación eléctrica, para lo cual se ha tenido en cuenta el orden de conexiones entre las entradas y salidas físicas del relé programable.

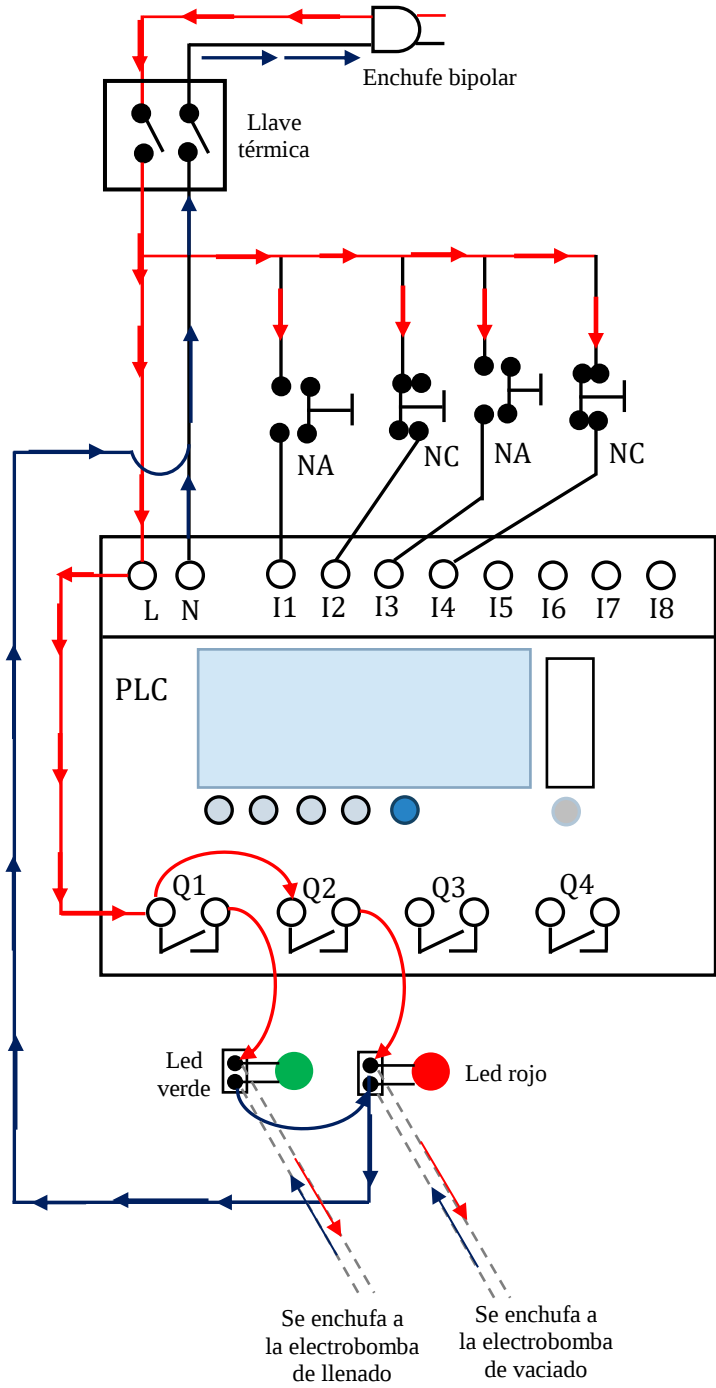


Figura 21. Esquema de instalación eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Diseño muestral

Para el control automático, se consideró como población al número total de elementos que conformaron el diagrama ladder, el mismo que se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Población} = N_{BI} + N_{SF} + N_{Cts} + N_T. \quad (28)$$

Donde:

N_{BI} : número de bobinas internas.

N_{SF} : número de salidas físicas.

N_{Cts} : número de contactos.

N_T : número de temporizadores.

En este sentido y en concordancia a lo descrito en la elaboración del diagrama ladder, se tiene que:

$$N_{BI} = 2 \text{ (M1 y M2)}, N_{SF} = 2 \text{ (Q1 y Q2)}, N_{Cts} = 8, N_T = 2 \text{ (TT1 y TT2)}.$$

$$\text{Población} = 2 + 2 + 8 + 2 = 14.$$

Es preciso indicar que el número de contactos se determinó de la siguiente manera: 4 contactos de entradas (I1, I2, I3 e I4), dos contactos de bobinas internas (M1 y M2) y dos contactos de temporizadores (TT1 y TT2). Así, el número de contactos (N_{Cts}) resultó igual a 8.

En consecuencia, el tamaño de la población en el control automático es igual a catorce (14). En la presente tesis, se ha utilizado el tipo de muestreo no probabilístico, teniéndose en cuenta los siguientes criterios:

Criterio de inclusión: se ha considerado exclusivamente como muestra, a las salidas físicas Q1 y Q2 del relé programable, ya que en estas salidas se deben enchufar a la electrobomba de llenado y a la electrobomba de vaciado, las mismas que deben

prenderse de acuerdo al tiempo programado en los temporizadores TT1 y TT2, respectivamente.

Criterio de exclusión: no se han tenido en cuenta como muestra a los siguientes elementos del diagrama ladder: las dos bobinas internas (M1 y M2), los ocho contactos y los dos temporizadores (TT1 y TT2); ya que se busca específicamente visualizar el estado de las salidas físicas del relé programable, en las cuales se deben conectar las electrobombas de llenado y vaciado.

Entonces, en relación a esto, el tamaño de la muestra en el control automático resultó igual a dos (2).

Para el caso de las operaciones de llenado y vaciado, la población se considera a la cantidad de pruebas de funcionamiento, lo cual indica que el tamaño de población podría ser una cantidad muy grande. Entonces, de este modo a criterio de los investigadores, se determinó que el tamaño de muestra es igual a las diez (10) pruebas de funcionamiento que se han llevado a cabo en el mencionado equipo; es decir, se realizaron cinco (5) pruebas para el llenado y cinco (5) pruebas para el vaciado.

Procedimientos de recolección de datos

La recolección de datos, estuvo fundamentado en las siguientes instrucciones que se señalan a continuación:

Elaboración del esquema del sistema automatizado

Este procedimiento, se llevó a cabo con la finalidad de determinar los componentes principales del sistema automatizado y la cantidad de entradas y salidas físicas que se emplearon en el relé programable.

Elaboración del circuito lógico (diagrama ladder)

Este procedimiento hizo posible fijar el orden de conexiones para las entradas y salidas físicas que se utilizaron en el relé programable, para lo cual se empleó como instrumento el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2 .

Determinación de las dimensiones del tanque cilíndrico horizontal (radio: R_T y longitud L_T)

Para este procedimiento, se utilizó como instrumento una wincha flexómetro (véase la tabla 1).

Determinación de los niveles de líquido inicial (h_i) y final ($h_{f(Ex)}$)

En este procedimiento se realizó una inspección al visor del tanque cilíndrico horizontal, al inicio y al final de cada prueba.

Determinación del valor del volumen inicial de líquido (V_i)

En este caso, se reemplazó en la ecuación (13) el valor del nivel inicial de líquido (h_i) junto con los valores de las dimensiones del tanque cilíndrico horizontal (radio: R_T y longitud L_T).

Determinación de los caudales que producen las electrobombas de llenado (Q_E) y vaciado (Q_S).

Para este procedimiento se hizo fluir el líquido, 5 min por la línea de llenado y 5 min por la línea de vaciado y se verificó el volumen registrado en los medidores que se encuentran instalados en dichas líneas, los cuales resultaron: 148 L y 153 L, respectivamente (véase la tabla 1). De esta manera los caudales de llenado y vaciado, se determinaron como se indica a continuación:

Q_E		Q_S		R_T	L_T
L/min	m ³ /s	L/min	m ³ /s	m	m
29.6	0.000493	0.000510	30.6	0.25	1

$$Q_E = \frac{148 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 29.6 \text{ L/min.}$$

$$Q_S = \frac{153 \text{ L}}{5 \text{ min}} = 30.6 \text{ L/min.}$$

Tabla 1. Parámetros necesarios para determinar los tiempos de llenado y vaciado.

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del tiempo correspondiente al llenado (t_{LL}) y vaciado (t_V)

En este procedimiento se aplicó la ecuación (14) para el tiempo de llenado y la ecuación (15) para el tiempo de vaciado.

Determinación del valor teórico del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$)

Para este caso se hizo uso de la ecuación (16) para el llenado y la ecuación (17) para el vaciado.

Determinación del valor experimental del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$)

Para ambas operaciones se aplicó la ecuación (18).

Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante la presente investigación se realizó de manera rigurosa y sistemática, con el propósito de validar empíricamente las hipótesis planteadas y verificar el correcto funcionamiento del sistema automatizado propuesto. Para ello, se emplearon herramientas de software, procedimientos de simulación y cálculos analíticos, los cuales se detallan a continuación:

Programación de la relación entre el volumen y nivel de líquido

Se utilizaron las ecuaciones (13) y (18), que permiten establecer la relación entre el volumen y el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Estas expresiones matemáticas fueron programadas en hojas de cálculo utilizando Microsoft Excel 2023, facilitando así el cálculo automatizado del volumen contenido en función de distintas alturas del líquido.

Cálculo del tiempo de llenado y vaciado

Las ecuaciones (14) y (15), que definen la relación entre el tiempo de operación y los volúmenes de llenado y vaciado, también fueron programadas en Microsoft Excel 2023. Estas fórmulas fueron aplicadas para predecir con exactitud el tiempo que el sistema debía mantener activas las electrobombas, de acuerdo al volumen deseado, lo cual se comparó con los datos reales obtenidos en las pruebas.

Simulación del diagrama ladder

Para verificar la lógica de funcionamiento del sistema de control, se realizó la simulación del diagrama ladder utilizando el software Zelio Soft2 V 5.4.2, compatible con el relé programable utilizado. Esta simulación permitió verificar en entorno virtual el comportamiento lógico del sistema ante diferentes combinaciones de entradas, temporizadores y condiciones de enclavamiento, antes de su implementación física.

Transferencia del diagrama ladder desde una PC al relé programable

Una vez validado el diagrama ladder en simulación, se procedió a la transferencia de datos desde la PC al relé programable, mediante un cable de transmisión de datos. Esta acción permitió ejecutar el control lógico de forma autónoma en el hardware (relé programable), replicando la lógica diseñada y puesta a prueba en la realidad.

Determinación del error porcentual

Para medir la precisión del sistema y contrastar los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente, se calculó el error porcentual en el volumen final de líquido.

- El valor teórico del volumen final en las operaciones de vaciado y llenado fue calculado a partir de las ecuaciones (16) y (17), respectivamente, las cuales también fueron programadas en Microsoft Excel 2023.
- El valor experimental del volumen final se obtuvo a través de la aplicación práctica de la ecuación (18), a partir de los niveles reales registrados durante las diez pruebas de funcionamiento.
- Finalmente, el error porcentual se determinó mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}|}{V_{f(T)}} \times 100 \quad (29)$$

Este indicador permitió evaluar la precisión y confiabilidad del sistema automatizado, y fue clave para validar la hipótesis principal del estudio.

En conjunto, el procesamiento y análisis de datos aplicados en esta investigación garantizan una lectura cuantitativa rigurosa del funcionamiento del sistema automatizado. El uso de herramientas digitales como Excel y Zelio Soft2 facilitó el manejo de cálculos complejos y simulaciones, mientras que la validación experimental confirmó la viabilidad del modelo diseñado.

Aspectos éticos

La presente investigación ha sido conducida bajo principios fundamentales de ética científica, integridad académica y responsabilidad profesional, en cumplimiento con los estándares establecidos por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (FIQ-UNAP) y las buenas prácticas de investigación tecnológica.

Como autores de este trabajo, declaramos de manera expresa que el estudio es original, y que no existe ningún tipo de plagio parcial o total respecto a investigaciones previas, artículos científicos, informes técnicos o documentos de terceros. Todo contenido tomado como referencia ha sido debidamente citado conforme a las normas bibliográficas correspondientes, y se ha hecho un uso ético y respetuoso de las fuentes consultadas.

En el mismo sentido, todos los resultados presentados en este documento son auténticos y derivados directamente del trabajo de campo, las simulaciones y las pruebas técnicas realizadas durante la implementación y evaluación del sistema automatizado. En particular, se reconoce con total transparencia la ejecución de diez (10) pruebas funcionales controladas sobre el equipo implementado, cuyas condiciones operativas fueron registradas con rigurosidad y cuyos datos fueron tratados sin ningún tipo de alteración o manipulación indebida.

Asimismo, se actuó con total honestidad durante el diseño del prototipo, la programación del relé, la conexión de dispositivos físicos, y el análisis de las respuestas del sistema. Cada una de las etapas del proceso fue guiada por criterios técnicos y académicos, respetando los principios de veracidad, objetividad y transparencia.

Finalmente, este trabajo no ha requerido la intervención de seres humanos ni ha implicado riesgos ambientales o industriales, por lo que no ha generado conflicto ético relacionado con la seguridad, la salud o el consentimiento informado. Sin embargo, como parte del compromiso profesional, se ha documentado el desarrollo del sistema con el fin de garantizar su trazabilidad y su posible replicabilidad en contextos educativos o industriales.

PARTE III

ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y PROPUESTA FINAL

Concluidas la etapa de diseño e implementación del sistema automatizado, esta tercera parte del libro se orienta a examinar con profundidad los resultados obtenidos, interpretarlos a la luz de las hipótesis planteadas, y proponer conclusiones técnicas que sirvan de base para futuras aplicaciones, mejoras o desarrollos similares.

El proceso de análisis involucra la comparación detallada entre los **valores** teóricos, obtenidos mediante fórmulas matemáticas programadas, y los datos experimentales recolectados durante las pruebas de funcionamiento del sistema. Este contraste permite identificar el grado de precisión del modelo automatizado, cuantificar posibles márgenes de error, y evaluar la eficiencia real del sistema implementado en condiciones prácticas.

Asimismo, se desarrollan interpretaciones técnicas que explican el comportamiento del sistema ante distintas configuraciones, condiciones de operación o escenarios de prueba. Estas reflexiones son fundamentales para validar o refutar las hipótesis formuladas, y para establecer el alcance real del sistema en términos de confiabilidad, escalabilidad y aplicabilidad industrial.

La presentación de resultados se organiza en tablas comparativas, gráficos de comportamiento y análisis porcentual de errores, lo que permite visualizar con claridad el grado de coincidencia o discrepancia entre lo esperado y lo observado. Además, se destacan patrones operativos y se identifican posibles fuentes de desviación, como variaciones en el nivel y el volumen final del líquido, y respuesta de las electrobombas en relación al estado de las entradas y los componentes internos del relé programable.

Este capítulo constituye una etapa clave para validar o refutar las hipótesis del estudio, y representa el sustento empírico para el análisis e interpretación crítica que se desarrollará en el siguiente capítulo.

Finalmente, esta parte cierra con una propuesta técnica consolidada, en la que se exponen las lecciones aprendidas, las fortalezas del sistema y las recomendaciones que podrían incorporarse en futuras versiones o adaptaciones del prototipo. Con ello, se completa el ciclo investigativo, desde el planteamiento del problema hasta la generación de soluciones concretas y viables.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Este capítulo presenta los **resultados cuantitativos y cualitativos** obtenidos a partir de la implementación y funcionamiento del sistema automatizado para el control dinámico del llenado y vaciado de líquidos en un tanque cilíndrico horizontal. La finalidad es ofrecer evidencia empírica que permita evaluar la eficacia del sistema, su precisión operativa y su coherencia con los modelos teóricos previamente formulados.

Los datos que se exponen en este apartado han sido recolectados durante diez (10) ciclos de prueba, en los que se midieron variables como el nivel inicial y final del líquido, el volumen desplazado, y el tiempo de llenado o vaciado, tanto en condiciones teóricas como experimentales. Esta información se procesó con herramientas digitales, principalmente mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel 2023 (anexos 1 y 2), utilizando fórmulas previamente definidas para calcular volúmenes teóricos, tiempos estimados y errores porcentuales.

Tabla 2. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de llenado en relación al volumen inicial y al volumen de llenado.

Prueba	h_i		V_i	V_{LL}		$V_{f(T)}$	t_{LL}	
Nº	cm	m	m ³	L	L	L	min	s
1	9.8	0.098	0.02716	27.16	40	67.16	1.351	81.1
2	18.5	0.185	0.06604	66.04	45	111.04	1.520	91.2
3	26.6	0.266	0.10617	106.17	30	136.17	1.014	60.8
4	22.4	0.224	0.08520	85.20	38	123.20	1.284	77.0
5	17.1	0.171	0.05934	59.34	45	104.34	1.520	91.2

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del volumen inicial de líquido, que se indican en la tabla 2, se han determinado aplicando la ecuación (13), en donde se reemplazaron los valores del nivel inicial de líquido (h_i) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 1). De esta forma, para obtener la

cantidad correspondiente a la segunda prueba ($V_i = 0.06604 \text{ m}^3 = 66.04 \text{ L}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]$$

$$V_i = (1) \left[(0.185 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.185 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.185 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_i = 0.06604 \text{ m}^3 = 66.04 \text{ L}.$$

Los valores teóricos del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$), que se muestran en la tabla 2, se han determinado aplicando la ecuación (16), en donde se reemplazaron los valores del volumen inicial de líquido (V_i) y del volumen de llenado (V_{LL}). De esta manera, para obtener el valor que corresponde a la segunda prueba ($V_{f(T)} = 111.04 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL} = 66.04 + 45 = 111.04 \text{ L}.$$

Los valores del tiempo de llenado (t_{LL}), que se dan a conocer en la tabla 2, se han obtenido aplicándose la ecuación (14), en donde se reemplazaron los valores del volumen de llenado (V_{LL}) y el caudal de entrada al tanque cilíndrico horizontal ($Q_E = 29.6 \text{ L/min}$) (véase también la tabla 1). Por ejemplo, para obtener la cantidad que corresponde a la segunda prueba ($t_{LL} = 1.520 \text{ min} = 91.2 \text{ s}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E} = \frac{45 \text{ L}}{29.6 \text{ L/min}} = 1.520 \text{ min} = 91.2 \text{ s}.$$

Tabla 3. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de llenado.

Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$		$V_{f(T)}$	Error
Nº	cm	m	m ³	L	L	%
1	18.8	0.188	0.06750	67.50	67.16	0.501
2	27.5	0.275	0.11065	110.65	111.04	0.352
3	32.5	0.325	0.13510	135.10	136.17	0.782
4	29.9	0.299	0.12252	122.52	123.20	0.553
5	26.3	0.263	0.10467	104.67	104.34	0.316

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados experimentales del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), que se indican en la tabla 3, se han obtenido aplicándose la ecuación (18), en donde se reemplazaron los valores del nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 1). De esta forma, para obtener el valor que corresponde a la segunda prueba ($V_{f(Ex)} = 0.11065$ m³ = 110.65 L), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(Ex)} = (1) \left[(0.275 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.275 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen\left(\frac{0.275 - 0.25}{0.25}\right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_{f(Ex)} = 0.11065 \text{ m}^3 = 110.65 \text{ L.}$$

Los resultados del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido, que se indican en la tabla 3, se han obtenido haciendo uso de la ecuación (29). De este modo, para obtener el valor correspondiente a la segunda prueba (Error = 0.352 %), se calculó como se indica a continuación:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}| \times 100}{V_{f(T)}} = \frac{|111.04 - 110.65| \times 100}{111.04} = 0.352 \%$$

Entonces, de esta forma es que se han obtenido todos los demás valores del volumen inicial de líquido, del tiempo de llenado, del volumen final de líquido y del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido.

Tabla 4. Valores teóricos del volumen final de líquido y del tiempo de vaciado en relación al volumen inicial y al volumen de vaciado.

Prueba	h_i		V_i	V_v	$V_{f(T)}$	t_v		
Nº	cm	m	m³	L	L	L	min	s
1	25.7	0.257	0.10167	101.67	30	71.67	0.980	58.8
2	38.5	0.385	0.16223	162.23	40	122.23	1.307	78.4
3	29.7	0.297	0.12154	121.54	45	76.54	1.471	88.2
4	33.4	0.334	0.13937	139.37	44	95.37	1.438	86.3
5	24.4	0.244	0.09518	95.18	35	60.18	1.144	68.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos del volumen final de líquido en la operación de vaciado.

Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error
Nº	cm	m	m ³	L	%
1	19.5	0.195	0.07090	70.90	1.083
2	29.7	0.297	0.12154	121.54	0.571
3	20.5	0.205	0.07580	75.80	0.965
4	24.4	0.244	0.09518	95.18	0.205
5	17.1	0.171	0.05934	59.34	1.384

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del volumen inicial de líquido, que se muestran en la tabla 4, se han determinado haciendo uso de la ecuación (13), en donde se reemplazaron los valores

del nivel inicial de líquido (h_i) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también la tabla 1). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_i = 0.12154 \text{ m}^3 = 121.54 \text{ L}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]$$

$$V_i = (1) \left[(0.297 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.297 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.297 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_i = 0.12154 \text{ m}^3 = 121.54 \text{ L.}$$

Los valores teóricos del volumen final de líquido ($V_{f(T)}$), que se dan a conocer en la tabla 4, se han determinado aplicándose la ecuación (17), en donde se reemplazaron los valores del volumen inicial de líquido (V_i) y del volumen de vaciado (V_V). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_{f(T)} = 76.54 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(T)} = V_i - V_V = 121.54 - 45 = 76.54 \text{ L.}$$

Los valores del tiempo de vaciado (t_V), que se muestran en la tabla 4, se han determinado aplicando la ecuación (15), en donde se reemplazaron los valores del volumen de vaciado (V_V) y el caudal de salida del tanque cilíndrico horizontal ($Q_S = 30.6 \text{ L/min}$) (véase también la tabla 1). De este modo, para obtener la cantidad correspondiente a la tercera prueba ($t_V = 1.471 \text{ min} = 88.2 \text{ s}$), el cálculo fue de la siguiente forma:

$$t_V = \frac{V_V}{Q_S} = \frac{45 \text{ L}}{30.6 \text{ L/min}} = 1.471 \text{ min} = 88.2 \text{ s.}$$

Los resultados experimentales del volumen final de líquido ($V_{f(Ex)}$), que se indican en la tabla 5, se han determinado aplicando la ecuación (18), en donde se reemplazaron los valores del nivel final de líquido ($h_{f(Ex)}$) con los valores del radio ($R_T = 0.25$ m) y la longitud ($L_T = 1$ m) del tanque cilíndrico horizontal (véase también

la tabla 1). Por ejemplo, para obtener el valor correspondiente a la tercera prueba ($V_{f(Ex)} = 0.07580 \text{ m}^3 = 75.80 \text{ L}$), el cálculo fue del siguiente modo:

$$V_{f(Ex)} = (1) \left[(0.205 - 0.25) \sqrt{(0.25)^2 - (0.205 - 0.25)^2} + (0.25)^2 \arcsen \left(\frac{0.205 - 0.25}{0.25} \right) + \frac{\pi}{2} (0.25)^2 \right]$$

$$V_{f(Ex)} = 0.07580 \text{ m}^3 = 75.80 \text{ L.}$$

Los resultados del error porcentual entre los valores experimentales y los valores teóricos del volumen final de líquido, que se muestran en la tabla 5, se han obtenido haciendo uso de la ecuación (29). Por ejemplo, para obtener la cantidad que corresponde a la tercera prueba (Error = 0.965 %), se realizó el cálculo siguiente:

$$\text{Error} = \frac{|V_{f(T)} - V_{f(Ex)}| \times 100}{V_{f(T)}} = \frac{|76.54 - 75.80| \times 100}{76.54} = 0.965 \text{ \%}.$$

Entonces, de esta forma es que se obtuvieron todos los demás valores del tiempo de llenado, del volumen final de líquido y del error porcentual correspondiente.

Tabla 6. Estado de Q1, en relación a la condición de los contactos I1, I2, t1 y M1.

	I1	I2	t1	M1	Q1	Electrobomba de llenado
Cantidad binaria	1	1	1	1	1	Prendido
	0	1	1	1	1	Prendido
	0	0	0	0	0	Apagado
	0	1	1	0	0	Apagado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Estado de Q2, en relación a la condición de los contactos I3, I4, t2 y M2.

	I3	I4	t2	M2	Q2	Electrobomba de vaciado
Cantidad binaria	1	1	1	1	1	Prendido
	0	1	1	1	1	Prendido
	0	0	0	0	0	Apagado
	0	1	1	0	0	Apagado

Fuente: Elaboración propia.

Las cantidades binarias (1) que se resaltan en la tabla 6, indican que la electrobomba de llenado (Q1) se encuentra prendida, debido a que los contactos I2, t1 y M1 se encuentran cerrados; sin embargo, para que el contacto M1 se pueda enclavar, es necesario presionar primero el pulsador I1. Entonces, en la tabla 6, las cantidades binarias que dan a conocer el estado de la electrobomba de llenado (Q1), se han obtenido haciéndose uso de la ecuación (26), es decir:

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = Q1. \quad (26)$$

$$1 * (1 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$0 * (0 + 0) * 0 = 0.$$

$$1 * (0 + 0) * 1 = 0.$$

Las cantidades binarias (1) que se resaltan en la tabla 7, indican que la electrobomba de vaciado (Q2) se encuentra prendida, debido a que los contactos I4, t2 y M2 se encuentran cerrados; no obstante, para que el contacto M2 se pueda enclavar, es necesario presionar primero el pulsador I3. Entonces, en la tabla 7, las cantidades binarias que dan a conocer el estado de la electrobomba de llenado (Q2), se obtuvieron haciéndose uso de la ecuación (27), es decir:

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = Q2. \quad (27)$$

$$1 * (1 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$0 * (0 + 0) * 0 = 0.$$

$$1 * (0 + 0) * 1 = 0.$$

También de las figuras 15 y 16, se puede observar que el estado de los temporizadores TT1 y TT2, depende específicamente del estado de las bobinas internas M1 y M2; lo cual, también se puede verificar mediante las ecuaciones (21) y (24), respectivamente.

$$I2 * (I1 + M1) * t1 = TT1. \quad (21)$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$I4 * (I3 + M2) * t2 = TT2. \quad (24)$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

$$1 * (0 + 1) * 1 = 1.$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El presente capítulo tiene como objetivo analizar críticamente los **resultados obtenidos** tras la implementación y prueba del sistema automatizado para el control de líquidos en un tanque cilíndrico horizontal, confrontándolos con las **hipótesis planteadas**, los **modelos teóricos aplicados** y los **antecedentes revisados**. Esta etapa representa un ejercicio reflexivo fundamental dentro del proceso investigativo, en tanto permite valorar la consistencia de los hallazgos y su grado de concordancia con lo previsto.

La discusión se organiza en torno a los principales indicadores evaluados: precisión del sistema en la regulación de niveles y volúmenes, exactitud en los tiempos de operación, estabilidad en el comportamiento lógico del sistema y márgenes de error aceptables frente a los valores teóricos. Se examinan también las ventajas operativas del sistema automatizado frente al control manual, y se identifican tanto **fortalezas técnicas** como **limitaciones prácticas** que surgieron durante las pruebas.

Asimismo, se comparan los resultados con investigaciones previas y desarrollos similares descritos en la literatura técnica, con el fin de contextualizar los logros alcanzados y aportar un juicio fundado sobre la **viabilidad, originalidad y aplicabilidad** de la solución propuesta. Se abordan también las condiciones que podrían mejorar el rendimiento del sistema o permitir su adaptación a otros contextos operacionales.

En suma, esta discusión permite **validar el aporte técnico y científico del estudio**, interpretando sus alcances reales y ofreciendo una visión crítica y fundamentada que da paso a las conclusiones y recomendaciones finales.

En la tabla 3, se puede observar que el mínimo (0.316 %) y máximo (0.782 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido en la operación de llenado, se obtuvieron en las pruebas 5 y 3, respectivamente. En la tabla 5, se puede observar que el mínimo (0.205 %) y máximo (1.384 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido en la operación de vaciado, se obtuvieron en las pruebas 4 y 5, respectivamente.

Esto indica que el máximo error porcentual con respecto al volumen final de líquido, se obtiene en la operación de vaciado.

Arce y Arce (2012, pp. 75-80), realizaron siete pruebas en el tanque cilíndrico, de las cuales la primera fue de sólo llenado, la segunda y tercera de sólo vaciado y de la cuarta a la séptima en forma simultánea llenado y vaciado. Los resultados que obtuvieron, indican que el mínimo (0.668 %) y máximo (2.783 %) error porcentual con respecto al volumen final de líquido, corresponden a la tercera y sexta prueba, respectivamente.

Entonces, al confrontar los resultados que se muestran en las tablas 3 y 5, con los resultados obtenidos por Arce y Arce (2012, pp. 75-80), se puede decir que la información obtenida en la presente investigación tiene un grado de confiabilidad mayor de 95 %; lo cual también prueba la validez de las ecuaciones **(13)** y **(18)**, ya que el error porcentual máximo con respecto al volumen final de líquido en las operaciones de vaciado y llenado del tanque cilíndrico horizontal resultaron mucho menor del 5 %.

En esta investigación, se ha utilizado el cable de transmisión de datos (figura 3) con puertos COM y USB, los cuales se conectaron al relé programable y a la PC (laptop); de este modo los tiempos de llenado y vaciado se escribieron en la ventana de parámetros de los temporizadores TT1 y TT2 (figura 17), empleándose para esto el software de simulación Zelio Soft2 V5.4.2. De esta forma, el encendido de las electrobombas de llenado y vaciado se efectuó desde una PC (laptop), simplemente con realizar un clic sobre los contactos I1 e I3. Esto a su vez hizo posible, que se pueda ver en tiempo real, el estado de los temporizadores TT1 y TT2 y de las salidas físicas Q1 y Q2 del relé programable; lo cual demuestra que, mediante la implementación de dicho sistema automatizado, se ha podido realizar de manera eficiente el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.

CONCLUSIONES

La presente sección tiene como finalidad sintetizar los hallazgos más relevantes de la investigación, a partir del análisis del diseño, implementación, pruebas y evaluación del sistema automatizado para el control dinámico del llenado y vaciado de líquidos en un tanque cilíndrico horizontal. Las conclusiones surgen como resultado de la confrontación entre los objetivos planteados, las hipótesis formuladas y los datos obtenidos, y expresan el grado de cumplimiento, validez y pertinencia del estudio.

Cada conclusión ha sido elaborada sobre la base de evidencia empírica, análisis técnico y observación directa del comportamiento del sistema, tanto en simulación como en condiciones reales de operación. Se abordan aspectos clave como la efectividad del relé programable, la precisión del control de niveles y tiempos, la relación funcional entre variables físicas y lógicas, y la utilidad del sistema en contextos de automatización a pequeña escala.

Además, se valoran los aportes del proyecto no solo desde el punto de vista técnico, sino también desde su aplicabilidad práctica, su replicabilidad en entornos educativos o industriales, y su potencial como base para futuras investigaciones o mejoras tecnológicas.

Las conclusiones aquí presentadas, por tanto, no solo resumen lo realizado, sino que dan cierre al proceso investigativo con afirmaciones claras, fundamentadas y orientadas a consolidar el aporte del estudio al campo de la ingeniería aplicada y el control automatizado de procesos.

Se determinó la relación entre el volumen de líquido con el nivel de líquido en un tanque cilíndrico horizontal (ecuación (12)), la cual se adecuó a las ecuaciones (12) y (18) para determinar el volumen inicial de líquido y el valor experimental del volumen final de líquido, respectivamente; cumpliéndose de esta manera con el primer objetivo específico y juntamente verificándose la primera hipótesis específica. Además, en los resultados que se muestran en las tablas 2, 3, 4 y 5, se puede observar que cuanto mayor es el nivel de líquido, mayor es el volumen de líquido; por lo tanto, se concluye que existe una relación directa entre el volumen con el nivel de líquido.

Se ha determinado la ecuación (14), la misma que da a conocer la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y el volumen de llenado. También, en esta sección se ha determinado la ecuación (17), la misma que representa a la relación entre el volumen final de líquido, el volumen inicial de líquido y el volumen de vaciado. De esta manera se ha logrado el segundo objetivo específico y simultáneamente se ha probado la segunda hipótesis específica. En los resultados que se indican en la tabla 2, se puede ver que cuanto mayor es el volumen inicial y el volumen de llenado, mayor es el volumen final; por lo tanto, se puede decir que existe una relación directa entre el volumen final con el volumen inicial y el volumen de llenado. En los resultados que se muestran en la tabla 4, se puede observar que cuanto mayor es el volumen inicial, mayor es el volumen final; sin embargo, se puede observar que cuanto mayor es el volumen de vaciado, menor es el volumen final; por lo tanto, se concluye que existe relación directa entre el volumen final con el volumen inicial y existe una relación inversa entre el volumen final con el volumen de vaciado.

Se ha determinado la ecuación (16), la cual indica que existe relación entre el tiempo con el volumen de llenado en un tanque cilíndrico horizontal. De la misma forma, se ha determinado la ecuación (17), la cual representa a la relación entre el tiempo con el volumen de vaciado. De este modo se ha alcanzado el tercer objetivo específico y a su vez se ha probado la tercera hipótesis específica. En los resultados que se muestran en la tabla 2, se puede ver que cuanto mayor es el volumen de llenado, mayor es el tiempo que debe estar prendida la electrobomba de llenado; por lo tanto, existe una relación directa entre el tiempo de llenado con el volumen correspondiente. De la misma manera, en los resultados que se muestran en la tabla 4, se puede ver que cuanto mayor es el volumen de vaciado, mayor es el tiempo que debe estar prendida la electrobomba de vaciado; por lo tanto, existe una relación directa entre el tiempo de vaciado con el volumen correspondiente.

Se ha elaborado el circuito lógico (diagrama ladder) más adecuado para el control automático del llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal. Al mismo tiempo, esto hizo posible determinar el número de entradas y salidas físicas que se utilizaron del relé programable, las cuales son: cuatro entradas y dos salidas físicas. De

este modo, se cumplió con el cuarto objetivo específico y al mismo tiempo se comprobó la cuarta hipótesis específica.

También, se muestra la determinación de la relación entre la condición de las entradas I1 e I2, el estado de la bobina interna M1, el estado del contacto t1 y el estado de la salida física Q1 del relé programable. Asimismo, se ha hecho la determinación de la relación entre la condición de las entradas I3 e I4, el estado de la bobina interna M2, el estado del contacto t2 y el estado de la salida física Q2 del relé programable. De esta forma, se ha logrado el quinto objetivo específico y simultáneamente se ha probado la quinta hipótesis específica. Los resultados que se muestran en la tabla 6, revelan que la electrobomba de llenado (Q1) se encontrará prendida, siempre y cuando la bobina interna M1 se encuentre prendida; es decir, existe una relación directa entre el estado de Q1 con el estado de M1. Del mismo modo, los resultados que se indican en la tabla 7, dan a conocer que la electrobomba de vaciado (Q2) se encontrará prendida, necesariamente si M2 se encuentra prendida; es decir, existe una relación directa entre el estado Q2 con el estado de M2.

De esta manera, se ha concluido la presente investigación, llegando al objetivo general y al mismo tiempo verificándose la hipótesis general.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados obtenidos, los análisis realizados y las conclusiones previamente expuestas, esta sección presenta un conjunto de recomendaciones técnicas y operativas orientadas a fortalecer la aplicación práctica del sistema automatizado propuesto, así como a guiar futuras implementaciones, adaptaciones o investigaciones en el campo del control automático de procesos hidráulicos.

Las recomendaciones están dirigidas a usuarios técnicos, investigadores, docentes y profesionales interesados en sistemas de automatización a pequeña y mediana escala. Se formulan con base en la experiencia acumulada durante la construcción, programación, prueba y evaluación del sistema, y consideran tanto los aciertos como las limitaciones identificadas a lo largo del desarrollo del proyecto.

Asimismo, se proponen posibles mejoras en aspectos como la precisión de sensores, el uso de controladores más robustos, la incorporación de sistemas de monitoreo remoto o la optimización del consumo energético. También se plantean sugerencias para el fortalecimiento del componente formativo en entornos educativos donde este tipo de prototipo puede servir como herramienta didáctica.

En suma, las recomendaciones buscan potenciar el impacto y la aplicabilidad del sistema, promoviendo su evolución desde un modelo experimental a una solución adaptable y funcional en escenarios reales de la industria o la formación técnica.

Para un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar las ecuaciones **(12)** y **(18)**, para determinar el valor inicial del volumen de líquido y el valor experimental del volumen final de líquido, respectivamente.

Para determinar el tiempo de llenado en un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar la ecuación **(14)**, para lo cual se debe evaluar previamente el caudal que produce la electrobomba de llenado.

Para determinar el tiempo de vaciado en un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda utilizar la ecuación **(15)**, para lo cual se debe evaluar previamente el caudal que produce la electrobomba de vaciado.

En la operación de llenado de un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda hacer uso de la ecuación **(16)** cuando se evalué el valor teórico del volumen final de líquido, para lo cual se debe conocer previamente los valores del volumen inicial y de llenado.

Para determinar el valor teórico del volumen final en la operación de vaciado de en un tanque cilíndrico horizontal, se recomienda hacer uso de la ecuación **(17)**, para lo cual se debe conocer previamente el volumen inicial de líquido y el volumen de vaciado.

Es recomendable el uso del cable de transmisión de datos, cuando se realice el vaciado y llenado del tanque cilíndrico horizontal; de esta manera se podrá observar en tiempo real, el estado de las salidas físicas del relé programable, en las cuales se vinculan las electrobombas de llenado y vaciado.

Con la finalidad de impedir percances que puedan perturbar el trabajo de las electrobombas de llenado y vaciado con el relé programable, es recomendable realizar una inspección periódica a todos los dispositivos que conforman el sistema automatizado: relé programable, electrobombas de llenado y vaciado, llave térmica, conexiones eléctricas, pulsadores y luces led, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, Fredy y ARCE, Aldo. Diseño, construcción e instalación de un tanque cilíndrico horizontal, para calcular la variación del nivel de líquido en función del tiempo en la FIQ-UNAP. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2013. pp. 1-120.

CHONG, Pablo y FERREYRA, Juan. Construcción e instalación de un prototipo para llenado de botellones con agua y su implementación con un controlador lógico programable. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. xii, 21, 31-34, 39-73.

CUCAT, Yuan. Implementación de una plataforma de capacitación en control industrial para los alumnos de ingeniería electrónica - UNPRG. Tesis para optar el título profesional de ingeniero electrónico. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, 2020. pp. 16-17.

DEL ÁGUILA, Jesús y HAQUIWARA, Irma. Diseño, construcción e instalación de un prototipo con controlador lógico programable para automatizar el tiempo de funcionamiento de cuatro electrobombas. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2022. pp. 6, 14.

ESTRELLA, Naomi y PANDURO, Jahel. Mejoramiento de un equipo para el drenaje de líquidos en tanques cónicos mediante la implementación de un sistema automatizado. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. pp. xi, 1-60.

- FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Principios elementales de los procesos químicos. 4a. ed. México: Limusa Wiley, 2018. 546 p. ISBN: 978-607-05-0852-3.
- GÓMEZ, Hadryan y HUAYAS, Milagros. Mejoramiento del control automático de dos equipos del Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana-2023. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2024. pp. 8-10, 15, 18.
- HONORIO, José y MOLINA, Jhonatan. Diseño, construcción e instalación de un equipo para el estudio del control automático del nivel de líquido en dos tanques. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2023. 19 p.
- JARA, Johnny y RAMOS, Jhon. Diseño y construcción de un prototipo automatizado de un sistema de bombeo de agua para riego pecuario y consumo humano utilizando energía fotovoltaica. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agrícola. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Agrícola, Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, 2018. pp. xi, 99-101.
- MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 7a. ed. México: Pearson Educación, S.A, de C.V., 2015. pp. 120, 141. ISBN: 978-607-32-3288-3.
- RODRÍGUEZ, Julián; CERDÁ, Luis y BEZOS, Roberto. Automatismos Industriales. 2a. ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2022. pp. 2, 7, 313. ISBN 13: 978-84-1366-161-2.
- VENERO, Armando. Análisis Matemático 2. 1a. ed. digital. Lima, Perú: Ediciones Gemar, 2020. 682 p. ISBN DIGITAL: 978-612-45216-6-9.

ANEXOS

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

Anexo 1. Hoja de cálculo para la operación de llenado.

E6																
2																
3	Prueba	h_i		V_i	V_{LL}	$V_{f(T)}$	t_{LL}			Q_E	R_T	L_T				
4	Nº	cm	m	m³	L	L	L	min	s	L/min	m³/s	m	m			
5	1	9.8	0.098	0.02716	27.16	40	67.16	1.351	81.1	29.6	0.000493	0.25	1			
6	2	18.5	0.185	0.06604	66.04	45	111.04	1.520	91.2							
7	3	26.6	0.266	0.10617	106.17	30	136.17	1.014	60.8							
8	4	22.4	0.224	0.08520	85.20	38	123.20	1.284	77.0							
9	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	45	104.34	1.520	91.2							
10																
11	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error										
12	Nº	cm	m	m³	L	L	%									
13	1	18.8	0.188	0.06750	67.50	67.16	0.501									
14	2	27.5	0.275	0.11065	110.65	111.04	0.352									
15	3	32.5	0.325	0.13510	135.10	136.17	0.782									
16	4	29.9	0.299	0.12252	122.52	123.20	0.553									
17	5	26.3	0.263	0.10467	104.67	104.34	0.316									
18																

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

$$t_{LL} = \frac{V_{LL}}{Q_E}. \quad (14)$$

$$V_{f(T)} = V_i + V_{LL}. \quad (16)$$

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

Anexo 2. Hoja de cálculo para la operación de vaciado.

E5																
1																
2	Prueba	h_i		V_i	V_V	$V_{f(T)}$	t_V				Q_s	R_T	L_T			
3	Nº	cm	m	m ³	L	L	L	min	s		L/min	m ³ /s	m	m		
4	1	25.7	0.257	0.10167	101.67	30	71.67	0.980	58.8		30.6	0.000510	0.25	1		
5	2	38.5	0.385	0.16223	162.23	40	122.23	1.307	78.4							
6	3	29.7	0.297	0.12154	121.54	45	76.54	1.471	88.2							
7	4	33.4	0.334	0.13937	139.37	44	95.37	1.438	86.3							
8	5	24.4	0.244	0.09518	95.18	35	60.18	1.144	68.6							
9																
10	Prueba	$h_{f(Ex)}$		$V_{f(Ex)}$	$V_{f(T)}$	Error										
11	Nº	cm	m	m ³	L	L	%									
12	1	19.5	0.195	0.07090	70.90	71.67	1.083									
13	2	29.7	0.297	0.12154	121.54	122.23	0.571									
14	3	20.5	0.205	0.07580	75.80	76.54	0.965									
15	4	24.4	0.244	0.09518	95.18	95.37	0.205									
16	5	17.1	0.171	0.05934	59.34	60.18	1.384									
17																
18																

$$V_i = L_T \left[(h_i - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_i - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_i - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (13)$$

$$t_V = \frac{V_V}{Q_s}. \quad (15)$$

$$V_{f(T)} = V_i - V_V. \quad (17)$$

$$V_{f(Ex)} = L_T \left[(h_{f(Ex)} - R_T) \sqrt{R_T^2 - (h_{f(Ex)} - R_T)^2} + R_T^2 \arcsen \left(\frac{h_{f(Ex)} - R_T}{R_T} \right) + \frac{\pi}{2} R_T^2 \right]. \quad (18)$$

Anexo 3. Vistas de las pruebas de funcionamiento del sistema automatizado para el llenado y vaciado de un líquido en un tanque cilíndrico horizontal.



Diseño e implementación de un sistema automatizado para el control
dinámico de líquidos en tanques cilíndricos horizontales

